

## **PENGEMBANGAN MODEL FAVEUR UNTUK PENILAIAN KRITERIA RETENSI PADA GREEN ROOF DI PERANCIS**

### ***DEVELOPMENT MODEL FOR ASSESSMENT FAVEUR RETENTION GREEN ROOF CRITERIA IN FRANCE***

**Safitri Lisma<sup>1)</sup>, Berthier Emmanuel<sup>2)</sup>, Prastowo<sup>3)</sup>, Pandjaitan Nora<sup>4)</sup>**

<sup>1)</sup> Mahasiswa Pascasarjana (S2) Program Studi Teknik Sipil dan Lingkungan, SPs IPB

<sup>2)</sup> Kepala unit Hidrologi, Manajemen Air Hujan di Centre d'Etudes de Technique et d'Equipement Prancis

<sup>3,4)</sup> Staf Pengajar Departemen Teknik Sipil dan Lingkungan, Institut Pertanian Bogor

E-mail : lisma.safitri@yahoo.com

Diterima: 05 Mei 2014; Disetujui 15 Oktober 2014

#### **ABSTRAK**

Pemanfaatan green roof meningkat secara signifikan selama 10 tahun terakhir di Prancis. Tidak terumuskannya kriteria hidrologis untuk merancang dan mengevaluasi pemanfaatan green roof untuk pengelolaan air hujan khususnya di Prancis menjadi masalah tersendiri. Tujuan dari penelitian ini adalah untuk mengembangkan sebuah tools dalam model FAVEUR untuk menilai kinerja kriteria retensi green roof. Dalam penelitian ini kriteria retensi green roof dihitung dalam 3 skala waktu yaitu tahunan, musiman dan setiap kejadian hujan. Simulasi model FAVEUR dengan variasi parameter untuk  $n_{calc}=500$  menghasilkan nilai kriteria retensi rata-rata : tahunan antara 301-470 mm (48-75% dari curah hujan tahunan), retensi musim panas antara 218-327 mm (35-52% dari curah hujan tahunan), retensi musim dingin antara 84-143 mm (13-23% dari curah hujan tahunan). Selanjutnya untuk kriteria retensi kejadian hujan, nilai maksimum selalu berbanding lurus dengan kapasitas retensi dalam interval 12-100 mm, nilai minimum selalu sama dengan 0 dan rata-rata antara 5.13-44.46 mm. Kriteria retensi ini menunjukkan korelasi yang baik dengan kapasitas intersepsi ( $C_{int}$ ). Berdasarkan korelasi tersebut, disusunlah 48 persamaan polinomial kriteria retensi dalam tiga skala waktu berbeda. Selanjutnya, berdasarkan hubungan kriteria retensi green roof dan karakteristik fisik green roof terhadap kapasitas intersepsi, sebuah tools penilaian kinerja hidrologis green roof telah berhasil disusun dalam format Excel<sup>®</sup>. Tools ini dapat menunjukkan kinerja hidrologis green roof khususnya kriteria retensi dengan memvariasikan karakteristik fisik green roof seperti jenis vegetasi, ketebalan substrat dan kapasitas air maksimum substrat (CME).

**Kata kunci:** Kinerja hidrologis green roof, kriteria retensi, model FAVEUR, Ile de France, manajemen kelebihan air hujan

#### **ABSTRACT**

Utilization of green roof has increased significantly in the last ten years in France. The lack of green roof's hydrological criterias to evaluate its performance in France especially is still a problem. The purpose of this study was to develop an assessment tools in FAVEUR model for predicting the green roof performance in managing rainfall excess in urban areas, especially in retention criteria. In this research, the retention criteria ( $Ab$ ) was calculated for different time-scales; annual, seasonal and rain-event. The simulation of FAVEUR parameters variation with  $n_{calc}=500$  showed the average of annual retention were between 301-470 mm (48-75% of annual rainfall), summer retention were between 218-327 mm (35-52% of annual rainfall) and winter retention were between 84-143 mm (13-23% of annual rainfall). Then for rain event time scales, the maximum retention were constantly linear with interception capacity in interval 12-100 mm, the minimum retention were continuously equal 0 and the average retention were between 5.13-44.46 mm. These results showed a good correlation with the interception capacity ( $C_{int}$ ). According to these correlations, the 48 polynomial equations were created in the three times-scales. Based on the correlation between green roof retention criteria and physical characteristic to interception capacity, the green roof's hydrological tools were developed on an Excel<sup>®</sup> sheet. This tools presented the hydrological performance of green roof especially the retention criteria by varying physical characteristics of green roof such as the type of vegetation, the thickness of the substrat and the water maximum capacity of the substrat (CME).

**Keywords:** Green roof hydrological performance, retention criteria, FAVEUR model, Ile de France, managing rainfall excess

## PENDAHULUAN

Salah satu konsekuensi dari urbanisasi adalah peningkatan lahan terbangun. Hal ini berdampak pada penurunan infiltrasi air hujan dan meningkatnya volume limpasan yang berpotensi menimbulkan banjir. Untuk mengatasinya saat ini banyak dilakukan alternatif upaya pengelolaan air hujan perkotaan, tetapi umumnya membutuhkan ketersediaan lahan yang luas. Oleh sebab itu, diupayakan alternatif lain seperti pemanfaatan atap rumah berupa *green roof*. Pemanfaatan permukaan atap (40-50% dari permukaan terbangun) dengan menggunakan *green roof*, diharapkan mampu menghidjaukan dan juga mengoptimalkan pengelolaan air hujandengan adanya retensi pada *green roof* (Palla, et al. 2009).

Saat ini di Prancis penggunaan *green roof* sedang berkembang. Manfaat *green roof*, khususnya dalam pengelolaan air hujan diantaranya adalah mengurangi limpasan karena adanya peningkatan retensi air dan evapotranspirasi serta memperlambat terjadinya puncak limpasan (Mentens et al., 2006). Tetapi saat ini belum tersedia kriteria rancangan untuk mengevaluasi pemanfaatan *green roof* sesuai dengan fungsinya untuk mengendalikan limpasan.

Oleh karena itu disusunlah sebuah konsep *Green roof* untuk Pengelolaan Air Hujan (TVGEP). Program ini bertujuan untuk meningkatkan pemahaman dan produktivitas *green roof* untuk pengelolaan air hujan perkotaan. Penelitian ini sendiri merupakan bagian akhir dari TVGEP tersebut, yaitu mengembangkan sebuah alat bantu kriteria rancangan untuk menilai retensi air pada *green roof*.

Berdasarkan latar belakang dan permasalahan yang telah diuraikan sebelumnya maka tujuan penelitian adalah (1) Menggunakan model FAVEUR (model fungsional untuk mengevaluasi kinerja *green roof* terhadap limpasan di kawasan perkotaan) untuk menganalisis simulasi limpasan dengan periode yang sama dengan data input; (2) Menganalisis retensi air pada *green roof* dan hubungannya dengan kapasitas intersepsi untuk variasi parameter model FAVEUR; (3) Menyusun alat bantu kriteria rancangan untuk mengevaluasi kinerja hidrologis *green roof*.

## KAJIAN PUSTAKA

### *Green roof*

Struktur *green roof* dari atas ke bawah secara umum terdiri dari (Lasalle 2008) :

1. Vegetasi; adapun jenis vegetasi yang sering digunakan pada struktur *green roof* adalah

Sedum dengan ciri-ciri daun dan bunga berwarna kuning hingga merah muda pucat, berdaun kecil dan tahan terhadap kekeringan (*Sedum album*, *Sedum rupestre*, *Sedum sexagulare*, *Sedum reflexum*, *Sedum kamchatikum*, *Sedum spurium*, *Sedum acre*), tanaman berbunga dengan ciri-ciri bunga lebat berwarna merah muda dan berdaun halus (*Tunic*, *Petrorhagia saxifraga*, *Allium schoenoprasum*, dan lain-lain) dan rumput (*Koeleria glauca*, *K.macrantha*, *Festuca rubra*, *Festuca ovina*, *Dianthus carthusianorum*, *Poa pratensis*).

2. Lapisan substrat yang merupakan media untuk vegetasi tumbuh; komposisi substrat biasanya terdiri dari campuran tanah dan atau kompos atau campuran antara agregat batu-batuan.
3. Lembaran filter geotextil yang membantu menahan substrat tetapi memungkinkan air untuk lolos;
4. Lapisan drainase yang memungkinkan drainase cepat; beberapa jenis lapisan drainase yang dapat digunakan antara lain: agregat mineral berporos seperti batuan dan pasir vulkanik, lempung serta lapisan polistiren dan lain-lain.

Saat ini, secara umum dikenal tiga jenis sistem vegetasi *green roof*; Dunnett & Kingsbury (2004) berikut: *green roof* Ekstensif (*Toitures Végétalisées Extensives*, TVE), *green roof* semi-intensif (*Toitures Végétalisées Semi Intensives*, TVSI) dan *green roof* Intensif (*Toitures Végétalisées Intensives*, TVI) :

1. *Green roof* Ekstensif

*Green roof* pada umumnya tidak memerlukan perawatan secara teratur. Ketebalan substrat yang diperlukan untuk jenis atap ini relatif tipis yaitu antara 1-15 cm.

2. *Green roof* Semi-Intensif

*Green roof* semi-intensif menggunakan teknologi yang ringan dan komposisi nutrisi yang sama seperti *green roof* ekstensif. Akan tetapi, ketebalan substrat yang dibutuhkan sedikit lebih tebal supaya tanaman yang ditanam di atasnya dapat lebih bervariasi.

3. *Green roof* Intensif

*Green roof* intensif ini pada dasarnya mirip dengan kebun atap. Tanamannya secara umum ditanam secara terpisah. Ketebalan substrat yang dibutuhkan untuk jenis atap ini adalah tidak kurang dari 15 cm. Berbeda dengan jenis *green roof* ekstensif, *green roof* intensif ini memerlukan perawatan secara rutin. Dengan begitu, *green roof* intensif dapat menampung berbagai jenis vegetasi seperti : pohon, semak, tanaman herba, rumput, dll.

Di Prancis, ADIVET (2007) telah menetapkan batasan dari ketiga kategori *green roof* sebagaimana yang tercantum pada Tabel 1.

### Manfaat *Green Roof* untuk Pengelolaan Air Limpasan Perkotaan

*Green roof* memiliki peran penting sebagai teknik alternatif (Technique Alternatives) dalam membantu mengalirkan limpasan ke hilir kawasan urban atau sering dikenal dengan istilah Sustainable Urban Drainage System (SUDS). Teknik ini dirancang agar air limpasan dapat dikelola secara maksimal pada sumbernya dan dengan begitu jumlah limpasan yang meningkat akibat permukaan tanah perkotaan yang tidak dapat menyerap air dapat dikurangi. Manfaat *green roof*, khususnya dalam pengelolaan air hujan diantaranya adalah mengurangi air limpasan karena adanya peningkatan penyimpanan air dan evapotranspirasi serta memperlambat terjadinya puncak limpasan (Mentens *et al.* 2006).

Berthier dan Ramier (2010), yang telah melakukan studi pustaka menyimpulkan bahwa semua studi menunjukkan bahwa *green roof* efektif untuk mengurangi limpasan. Penurunan limpasan ini disebabkan oleh air limpasan yang tersimpan di substrat (retensi) maupun yang menguap (evapotranspirasi). Menurut Carter dan Rasmussen (2007), sebuah *green roof* dapat menurunkan limpasan antara 20 sampai 30% dibanding atap biasa. Akan tetapi, kapasitas *green roof* untuk menahan limpasan akan maksimum pada kondisi

hujan dengan curah hujan rendah dan frekuensinya sering. Penurunan limpasan akan maksimum pada awal kejadian hujan. *Green roof* dalam hal ini bertindak sebagaimana ruangan penyimpanan yang memiliki kapasitas retensi (Berthier dan Ramier 2010). Ketika jumlah air yang tertahan mencapai kapasitas simpannya, *green roof* akan menyerupai atap biasa yang tidak dapat lagi menahan air.

Selain itu, musim juga berpengaruh pada *green roof*. Contohnya, pada musim panas, tingkat retensi akan lebih tinggi dibanding pada musim dingin. Bas dan Baskaran (2001) membuktikan bahwa pada musim panas tingkat retensi bervariasi antara 70-100% dan pada musim dingin retensi berkisar antara 40-50% tergantung dari desain *green roof* dan kondisi cuaca saat itu.

Faktor lainnya yang juga berpengaruh pada kapasitas retensi *green roof* adalah ketebalan substrat. Peningkatan ketebalan substrat akan meningkatkan volume air limpasan yang tertahan di *green roof* (Baskaran dan Bass 2001).

### Percobaan *Green Roof* di CETE Ile de France

Pengamatan eksperimental langsung pada *green roof* dilakukan di salah satu atap gedung di Centre d'Etudes de Technique et d'Equipement, Prancis (CETE IdF) mulai Juni 2011 sampai Oktober 2014. Ragam jenis dan tipe *green roof* pada atap gedung CETE IdF seluas 300 m<sup>2</sup> ditunjukkan pada Gambar 1. Berbagai komposisi struktur *green roof*

**Tabel 1** Tabel perbandingan *green roof* berdasarkan sistem perawatan dan karakteristik fisik *green roof* (ADIVET 2007)

Perawatan dan karakter fisik <i>green roof</i>	Sistem vegetasi <i>green roof</i>		
	<i>Green roof</i> Ekstensif	<i>Green roof</i> Intensif	
	Ekstensif	Semi-intensif	Intensif
Irigasi	Tidak	Ya	Ya
Jenis lapisan tumbuh	Substrat ringan	Substrat ringan	Tanah
Ketebalan substrat (cm)	3 - 15	12 - 30	> 30
Tingkat beban total (N/m <sup>2</sup> )	600 – 1800	1500 – 3500	> 6000
Dokumen referensi	<i>Règles professionnelles</i>	<i>Règles professionnelles</i>	DTU 43.1
Kemiringan maksimal (%)	20	20	5



**Gambar 1** Berbagai komposisi struktur *green roof* di CETE IdF (Berthier dan Ramier 2010)

pada CETE IdF yang ditunjukkan pada Gambar 1 adalah sebagai berikut :

1. BI atau atap tanpa vegetasi ;
2. GR atau atap dengan kerikil ;
3. *Green roof* GI15 merupakan *green roof* dengan jenis substrat untuk *green roof* semi-intensif dengan ketebalan 15 cm dan dengan jenis vegetasi campuran antara rumput dan sedum.
4. *Green roof* referensi S3EY merupakan jenis *green roof* yang dijadikan referensi dengan komposisi : substrat ringan yang diperuntukkan bagi *green roof* ekstensif, ketebalan substrat 3 cm, jenis vegetasi sedum dan sebuah lapisan drainase berupa polistiren ;
5. *Green roof* S3EZ merupakan *green roof* yang identik dengan *green roof* referensi hanya saja memiliki lapisan drainase yang terbuat dari bantalan pozolan yang memiliki sifat tahan air (*hydro-réentrice*) ;
6. *Green roof* SE15Y merupakan jenis *green roof* yang juga identik dengan *green roof* referensi, hanya ketebalan substrat yang berbeda yaitu 15 cm ;
7. *Green roof* G15EY yang identik dengan *green roof* referensi namun memiliki substrat dengan ketebalan 15 cm dan jenis vegetasi yang merupakan campuran antara rumput dan sedum ;
8. *Green roof* NE3Y merupakan atap tanpa vegetasi dengan substrat ekstensif 3 cm dan memiliki lapisan drainase berupa polistiren.

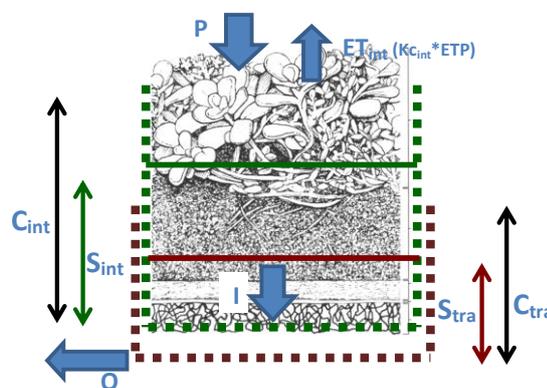
#### Deskripsi Model FAVEUR

Sebuah model yang menggambarkan tentang kondisi hidrologis *green roof* dikembangkan dalam tahap kedua pada program TVGEP. Struktur pertama model ini dikembangkan oleh Berthier *et al.* (2010). Dalam model ini, *green roof* dipresentasikan oleh tiga tangki, yaitu:

vegetasi, substrat dan lapisan drainase. Selanjutnya, model *green roof* ini disederhanakan oleh Pinta (2012) dan disebut sebagai model FAVEUR. Pada dasarnya, model FAVEUR memodelkan struktur *green roof* yang kompleks dalam dua tangki saja, yaitu :

1. tangki intersepsi yang mewakili fungsi intersepsi vegetasi dan substrat yang dapat menahan sebagian air hujan, yang kemudian akan menguap melalui proses evapotranspirasi. Tangki ini identik dengan kapasitas intersepsinya. Kapasitas intersepsi ini merepresentasikan volume air hujan yang mampu ditahan oleh vegetasi dan substrat.
2. tangki transfer yang mengalirkan kelebihan air sebagai fungsi kelebihan limpasan dari tangki intersepsi.

Struktur model FAVEUR ini jauh lebih sederhana dibanding model yang pertama. Secara sederhana, semua variabel yang berhubungan dengan tangki intersepsi diberi simbol "int" dan semua variabel yang berhubungan dengan tangki transfer diberi simbol "tra". Struktur model FAVEUR disajikan pada Gambar 2



**Gambar 2** Struktur model FAVEUR (Pinta 2012)

### Parameter Model FAVEUR

Model FAVEUR ini terdiri dari empat parameter utamayang dibedakan berdasarkan masing-masing fungsi tangki, yaitu fungsi intersepsi dan transfer.

#### a. Fungsi intersepsi ( $C_{int}, K_{C_{int}}$ )

Ada dua parameter utama yang memiliki fungsi intersepsi, yaitu  $C_{int}$  (kapasitas intersepsi) dan  $K_{C_{int}}$  (koefisien tanaman tangki intersepsi). Dalam model FAVEUR ini, kapasitas intersepsi dari ketiga lapisan *green roof* disederhanakan menjadi satu. Kapasitas intersepsi merupakan jumlah dari kapasitas intersepsi vegetasi ( $C_{veg}$ ), kadar air substrat pada kapasitas lapang ( $C_{subfc}$ ) dan kapasitas retensi yang tidak terduga pada lapisan drainase ( $C_{dra}$ ) yang masih harus dipelajari.  $K_{C_{int}}$  dalam model FAVEUR ini ditentukan berdasarkan jenis vegetasi. Dalam hal ini, ada dua jenis vegetasi yang digunakan: sedum dan rumput. Untuk itu, Berthier dan Ramier (2010) telah memvalidasi nilai  $K_{C_{int}}$  untuk kedua jenis vegetasi tersebut yaitu :  $K_{C_{int}} = 1$  untuk sedum dan  $K_{C_{int}} = 1.2$  untuk rumput.

#### b. Fungsi transfer ( $C_{tra}, T_{tra}$ )

Menurut Pinta (2012), baik lapisan substrat maupun drainase, keduanya terbukti berperan dalam proses transfer vertikal air dalam struktur *green roof*. Oleh karena itu,  $C_{tra}$  yang dalam hal ini menggambarkan transfer vertikal sangat dipengaruhi oleh jenis dan ketebalan substrat dan ketebalan lapisan drainase. Selain  $C_{tra}$ , parameter lain dari fungsi transfer ini adalah  $T_{tra}$  (geometri horizontal *green roof*, dalam meter).  $T_{tra}$  dalam hal ini diharapkan dapat menggambarkan hubungan perbandingan antara panjang geometri *green roof* ( $L$  dalam meter) dengan *velocity factor* ( $c$ , tanpa satuan) dalam skala *green roof*.

### Korelasi Parameter Model FAVEUR dan Karakteristik Fisik *Green Roof*

Berdasarkan pengamatan yang telah dilakukan pada *green roof* experimental CETE IdF, diperoleh sebuah korelasi antara parameter model FAVEUR yaitu  $C_{int}$  dengan karakteristik fisik *green roof*. Secara umum, ada 3 karakteristik fisik *green roof* yang umum diketahui yaitu jenis vegetasi, ketebalan substrat serta CME substrat (ADIVET 2007). Ramier *et al.* (2013) merumuskan hubungan antara  $C_{int}$  dan ketebalan serta CME substrat *green roof* seperti pada persamaan 1) dan 2).

Jika ketebalan  $< 5$  cm,  $C_{int}$  (cm) = CME (tanpa satuan) x ketebalan (cm) 1)

Jika ketebalan  $> 5$  cm,  $C_{int}$  (cm) = CME (tanpa satuan) x 50 2)

Selain ketebalan serta CME substrat, karakteristik fisik *green roof* lain yang juga berperan dalam model FAVEUR ini adalah jenis vegetasi. Jenis vegetasi merupakan karakteristik fisik yang berhubungan dengan parameter  $K_{C_{int}}$  dalam model.  $K_{C_{int}}$  pada penelitian ini dibedakan menurut dua jenis vegetasi yang biasa digunakan dalam konstruksi *green roof* yaitu  $S$  untuk sedum dan  $G$  untuk rumput. Dalam hal ini,  $K_{C_{int}} = 1$  untuk sedum dan  $K_{C_{int}} = 1.2$  untuk rumput (nilai tersebut berlaku selama musim panas, ditunjukkan pada Tabel 2).

## METODOLOGI

Penelitian ini dilaksanakan mulai bulan Februari - Juni 2013. Adapun periode simulasi mencakup data periode 18 tahun mulai dari 1 Juli 1993 sampai dengan 31 Desember 2011 (dengan catatan, data periode tahun 1996 dihilangkan karena data curah hujan pada periode tersebut tidak lengkap). Penelitian dilakukan di unit Hidrologi dan Manajemen Air Hujanle Centre d'Etudes de Techniques et de l'Equipementlle de France (CETE IdF), Trappes, Prancis.

Bahan-bahan yang diperlukan dalam penelitian ini adalah Plu1 (data series curah hujan tiap 300 detik dari Conseil General de Haute Seine dan ET1 (data evapotranspirasi potensial tiap 300 detik dengan menggunakan metode Penman-Monteith ) dari *Meteo France* Trappes untuk periode tahun 1993-2011. Sedangkan peralatan yang digunakan adalah seperangkat komputer yang dilengkapi dengan *software* Matlab Version 7.13 R2011b 2011 lisensi CETE IdF dan *Microsoft Office*.

Penelitian ini terdiri dari beberapa tahapan. Secara umum tahapan-tahapan tersebut disajikan pada Gambar 3.

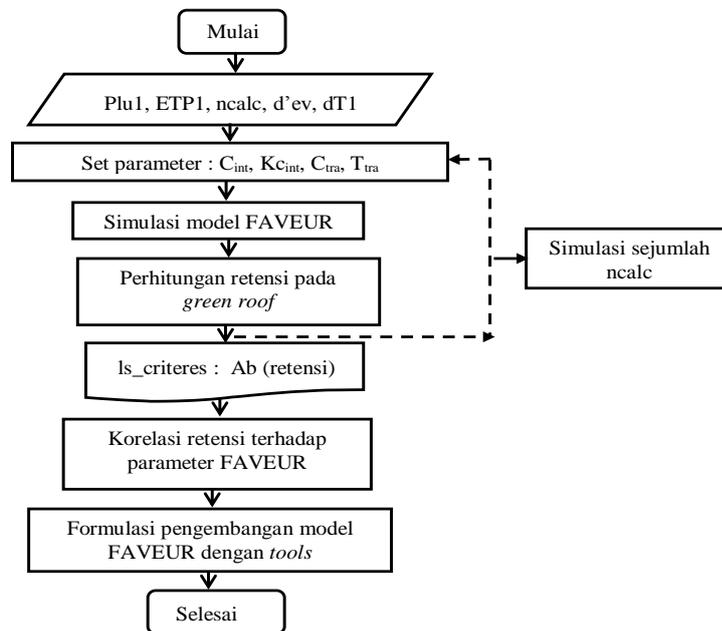
### Data Input dan Inisialisasi Parameter Simulasi

Sebelum simulasi dimulai, ada enam parameter simulasi harus diinisialisasi. Parameter pertama adalah  $n_{calc}$  (jumlah simulasi).  $n_{calc} = 1$  digunakan untuk simulasi tunggal dengan satu jenis *green roof*, sedangkan  $n_{calc} > 1$  digunakan untuk mensimulasikan *green roof* dengan variasi parameter model yang dapat menggambarkan ragam jenis *green roof* yang berbeda. Dalam hal ini digunakan  $n_{calc} = 500$  untuk simulasi variasi parameter model.

**Tabel 2** Nilai parameter model FAVEUR yang paling optimal untuk 6 jenis green roof eksperimental di CETE IdF (Pinta 2012)

Parameter FAVEUR	Jenis atap pada penelitian					
	S3	3E	S3EHy	S15	G15E	G15SI
$K_{C_{int}}$	1	1	1	1	1.2	1.2
$K_{C_{int}hiv}^*$	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5
$C_{int}$ (mm)	12	12	12	21	21	21
$C_{tra}$ (mm)	10	10	20	30	30	32

\* $K_{C_{int}hiv}$  = koefisien tanaman untuk musim dingin



**Gambar 3** Diagram alir penelitian

Berdasarkan uji sensitivitas ncalc dalam model FAVEUR, penurunan ncalc akan berimplikasi pada kurva hasil simulasi yang relative sama tetapi kurang detail sedangkan peningkatan ncalc menyebabkan waktu simulasi semakin lama sedangkan hasil akan sangat detail (Safitri 2014). Oleh sebab itu, dipilihlah ncalc=500 untuk jumlah simulasi yang paling sesuai.

Parameter kedua adalah  $dT1$  (*time step* data masukan) dan  $dT2$  (*time step* data simulasi).  $dT1$  ditetapkan sesuai dengan series data masukan yaitu 5 menit. Sedangkan pada simulasi,  $dT2$  diasumsikan sama dengan  $dT1$ . Akan tetapi, untuk menguji sensibilitas model, dilakukan juga variasi interval  $dT2$ .

Parameter ketiga adalah  $d'ev$  (durasi kejadian hujan) yang menjadi dasar penentuan jumlah kejadian hujan. Pada penelitian ini diasumsikan bahwa sebuah kejadian hujan dimulai pada saat curah hujan tidak sama dengan 0 dan

diakhiri pada saat curah hujan sama dengan 0 dengan asumsi durasi selama 12 jam ( $d'ev = 12$  jam). Adapun curah hujan yang dihitung adalah curah hujan > 1mm dan curah hujan > 5mm untuk kejadian hujan dan kejadian hujan terpilih selama durasi 12 jam.

Parameter keempat adalah *time step* hasil model atau data keluaran. Dalam hal ini ada tigaskala waktu yang akan dihasilkan, yaitu tahunan, musiman dan kejadian hujan. Untuk itu, yang perlu dilakukan adalah menentukan titik awal dari setiap skala waktu tersebut, seperti :  $ddeb_{an}$  yang mewakili waktu dimulainya periode tahunan,  $ddeb_{ete}$  yang mewakili waktu dimulainya periode musim panas,  $ddeb_{hiv}$  yang mewakili waktu dimulainya periode musim dingin dan  $ddeb_{ev}$  yang mewakili waktu dimulainya kejadian hujan serta  $dfin_{ev}$  yang mewakili waktu berakhirnya periode kejadian hujan.

Selanjutnya, parameter kelima dan keenam adalah  $S_{intinit}$  (simpanan air awal tangki intersepsi) dan  $S_{trainit}$  (simpanan air awal tangki transfer). Nilai  $S_{intinit}$  dan  $S_{trainit}$  diasumsikan sama dengan 0. Oleh sebab itu, simulasi dimulai pada saat simpanan air dalam kadar minimum yaitu pada saat musim musim panas. Asumsi ini yang menjadi dasar simulasi model FAVEUR dimulai pada tanggal 1 Juli 1993.

### Penentuan Parameter Model FAVEUR

Seperti telah disebutkan bahwa dalam model FAVEUR terdapat empat parameter utama, yaitu  $C_{int}$ ,  $K_{cint}$ ,  $T_{tra}$  dan  $C_{tra}$ . Untuk  $n_{calc} = 1$ , parameter yang digunakan merupakan parameter *green roof* referensi CETE IdF yang terdiri dari sebuah substrat untuk *green roof* ekstensif, dengan ketebalan 3 cm, jenis vegetasi sedum dan memiliki lapisan drainase dari polistiren dengan nilai sebagai berikut (Pinta 2012):

1.  $C_{int}$ : kapasitas intersepsi tangki intersepsi, 12 mm ;
2.  $K_{cint}$  yang merepresentasikan tipe vegetasi yaitu sedum, dalam hal ini ditentukan  $K_{cint} = 1$  ;
3.  $C_{tra}$ : kapasitas transfer untuk tangki transfer, dalam hal ini dipengaruhi oleh karakter hidro-retensi drainase, 10 mm ;
4.  $T_{tra}$  yang menggambarkan geometri horizontal *green roof*: 1000 mm.

Untuk  $n_{calc}=500$ , parameter  $C_{int}$ ,  $K_{cint}$ ,  $T_{tra}$  dan  $C_{tra}$  divariasikan secara acak sederhana (*simple random sampling*) untuk membentuk variasi konfigurasi keempat parameter tersebut. Dengan menggunakan metode acak sederhana ini, setiap parameter memiliki kemungkinan yang sama untuk muncul dalam setiap konfigurasi. Dengan demikian diharapkan konfigurasi parameter yang muncul dalam simulasi dapat merepresentasikan kemungkinan variasi nilai minimum hingga maksimum hasil simulasi. Adapun variasi acak sederhana keempat parameter seperti berikut ini :

1.  $C_{int} = [12 ;100]$  (mm);
2.  $K_{cint}$  = untuk parameter ini, perhitungan dilakukan 2 kali yaitu untuk  $K_{cint} =1$  untuk sedum dan  $K_{cint} =1.2$  untuk rumput (Tabel 2);
3.  $C_{tra} = [10 ;100]$  (mm);
4.  $T_{tra} = [100 ;1000]$  (mm).

### Persamaan dalam Model FAVEUR

Untuk menjalankan model FAVEUR, ada dua data utama yang dibutuhkan yaitu data curah hujan tiap 300 detik ( $Plu1$ ) dan evapotranspirasi potensial dalam 300 detik (ETP). Menurut FAO (2000), perhitungan evapotranspirasi aktual (ET) merupakan hasil dari ETP dengan bantuan sebuah koefisien korektor yang tergantung dari jenis

tanaman yang disebut sebagai koefisien tanaman (Kc). Pinta (2012) menghitung nilai ET dalam tangki intersepsi seperti pada persamaan 3).

$$ET = \min (S_{int}, ETP1 \times K_{cint}) \quad 3)$$

Dimana : ET = evapotranspirasi aktual (mm),  $S_{int}$  = simpanan air dalam tangki intersepsi (mm), ETP1 = evapotranspirasi potensial tiap 300 detik (mm),  $K_{cint}$  = koefisien tanaman tangki intersepsi.

Persamaan (3) menunjukkan bahwa ET tidak hanya bergantung pada nilai  $K_{cint}$  tetapi juga pada jumlah simpanan air dalam tangki intersepsi. Sumber dari seluruh proses evapotranspirasi adalah simpanan air yang ada di vegetasi. Oleh sebab itu, jika tidak ada persediaan air yang cukup, nilai ET maksimum yang akan terjadi hanya sejumlah nilai simpan air aktual. Dalam hal ini persamaan (13) berlaku pada saat  $Plu1$  sama dengan 0, sebaliknya ketika  $Plu1$  tidak sama dengan 0, ET dianggap 0 (Pinta 2012). Selain itu, persamaan (3) hanya berlaku untuk kondisi kering seperti pada musim panas. Oleh sebab itu, untuk membedakan variasi pertumbuhan tanaman pada *green roof*, Pinta (2012) mengasumsikan nilai  $K_{cint}$  pada musim dingin merupakan setengah dari nilainya pada musim panas seperti tertulis dalam persamaan 4).

$$ET = \min (S_{int}, ETP1 \times K_{cint} \times 0.5) \quad 4)$$

Setelah nilai ET pada tangki intersepsi dihitung, langkah selanjutnya yang dilakukan dalam model FAVEUR adalah menghitung nilai infiltrasi dari tangki intersepsi menuju tangki transfer. Infiltrasi dalam model FAVEUR dihitung secara sederhana sebagai selisih kelebihan dari simpanan air aktual di dalam tangki intersepsi dan kapasitas simpan airnya. Pinta (2012) menghitung infiltrasi dihitung berdasarkan persamaan 5).

$$I = \max (S_{int} + Plu1 - C_{int} - ET, 0) \quad 5)$$

Keterangan:

- I, infiltrasi (mm),
- $Plu1$ , curah hujan (mm),
- $C_{int}$ , kapasitas intersepsi tangki intersepsi (mm).

Langkah berikutnya adalah menghitung ulang nilai simpanan air aktual tangki intersepsi dan transfer. Pinta (2012) mengasumsikan perhitungan perubahan simpanan air pada tangki intersepsi transfer seperti pada persamaan 6) dan 7).

$$S_{int} = S_{int} + P - I - ET \quad 6)$$

$$S_{tra} = S_{tra} + I \quad 7)$$

Keterangan:

- $S_{tra}$ , simpanan air tangki transfer (mm).

Untuk tangki intersepsi, nilai simpanan aktual yang baru dihitung merupakan kelebihan dari variabel produksi (curah hujan dan cadangan awal) dan variabel transfer (infiltrasi dan evapotranspirasi). Untuk tangki transfer, evaporasi transfer dianggap nol sehingga infiltrasi dan simpanan air tangki transfer sebelumnya menjadi variabel utama pada persamaan (7). Pada bagian tangki transfer, ada sebagian air yang keluar sebagai limpasan. Pinta (2012) merumuskan perhitungan keluaran limpasan dari tangki transfer dengan persamaan 8).

$$Q_{tra} = \min (S_{tra}, dT2/T_{tra} \times S_{tra} \times (S_{tra}/C_{tra})) \quad (8)$$

Keterangan:

$Q_{tra}$ , limpasan tangki transfer (mm),

$C_{tra}$ , kapasitas transfer (mm),

$T_{tra}$ , geometri horizontal dari *green roof* (mm).

Terakhir, untuk menyelesaikan seluruh tahapan dalam model FAVEUR ini, nilai simpanan tangki transfer harus dihitung ulang. Secara prinsip, simpanan air aktual yang baru dari tangki transfer adalah surplus simpanan air sebelumnya dengan limpasan. Pinta (2012) menghitung simpanan air aktual tersebut berdasarkan persamaan 9).

$$S_{tra} = S_{tra} - Q_{tra} \quad (9)$$

### Perhitungan Kriteria Hidrologis *Green Roof*

Setelah menentukan parameter, langkah selanjutnya yang dilakukan adalah mensimulasikan model FAVEUR (Pinta 2012) dengan  $n_{calc} = 1$  untuk *green roof* referensi CETE IdF dan  $n_{calc} = 500$  untuk dapat memvariasikan parameter model FAVEUR. Untuk dapat menilai pengaruh *green roof* terhadap pengelolaan air hujan perkotaan, dalam hal ini dihitung nilai  $Ab$  (kriteria retensi, *abattement*) dalam mm dalam skala waktu tahunan, musiman dan setiap kejadian hujan.

Perhitungan kriteria retensi skala waktu tahunan dilakukan dengan dasar penjumlahan seluruh elemen-elemen yang bersangkutan untuk tiap interval simulasi 300 detik ( $dT1$ ) sebanyak data tahunan. Untuk skala musiman, agar dapat mengetahui perbedaan yang ekstrim antar musim diasumsikan hanya ada duamusim, yaitu musim panas dan musim dingin. Setiap musim berlangsung selama 6 bulan. Musim panas berlangsung dari Mei sampai Oktober dan musim dingin berlangsung dari bulan November sampai April tahun berikutnya. Prinsip perhitungan kriteria hidrologis skala musiman sama dengan skala tahunan yaitu dengan menjumlahkan seluruh elemen-elemen yang bersangkutan untuk tiap interval simulasi 300 detik ( $dT1$ ) sebanyak data musiman (6 bulanan). Untuk menghitung kriteria pada skala setiap kejadian hujan, diperlukan

identifikasi jumlah kejadian hujan selama periode simulasi 1993-2011. Berdasarkan definisi kejadian hujan yang telah ditentukan, dari kejadian hujan dengan curah hujan > 1mm diperoleh 1438 kejadian hujan sedangkan dari kejadian hujan dengan curah hujan > 5 mm diperoleh 694 kejadian hujan.

Dalam penelitian ini, yang dinamakan kriteria  $Ab$  (retensi) adalah bagian dari air hujan benar-benar yang tertahan di dalam *green roof* yang kemudian akan menjadi bagian yang mengalami evapotranspirasi maupun bagian yang tersimpan pada *green roof* dan tidak akan keluar sebagai limpasan.  $Ab$  menggambarkan perbedaan antara volume air hujan total ( $Plu1$ ) dan limpasan ( $Q1$ ) dalam mm. Pada skala tahunan,  $Ab$  dihitung sebagaimana pada persamaan 10).

$$Ab_{an} = \sum_{a=1}^{an} Plu1an - \sum_{a=1}^{an} Q1an \quad (10)$$

Dengan perhitungan bulanan,  $Ab_{ete}$  ( $Ab$  musim panas) dan  $Ab_{hiver}$  ( $Ab$  musim dingin) dihitung dengan persamaan 11) dan 12).

$$Ab_{ete} = \sum_{m=5}^{m=10} Plu1ete - \sum_{m=5}^{m=10} Q1ete \quad (11)$$

$$Ab_{hiver} = (\sum_{m=1}^{m=4} Plu1hiv - \sum_{m=1}^{m=4} Q1hiv) + (\sum_{m=11}^{m=12} Plu1hiv - \sum_{m=11}^{m=12} Q1hiv) \quad (12)$$

Keterangan:

$a(n)$ , tahun ke- $n$ ,

$m$ , bulan,

$Q1_{an}$ ,  $Q1_{ete}$  dan  $Q1_{hiver}$ , jumlah limpasan tahunan, limpasan selama musim panas dan limpasan selama musim dingin (mm),  
 $Plu1_{an}$ ,  $Plu1_{ete}$  dan  $Plu1_{hiver}$ , curah hujan tahunan, musim panas dan musim dingin (mm).

Untuk perhitungan  $Ab$  skala kejadian hujan, yang dihitung merupakan kapasitas retensi di awal kejadian hujan.  $Ab$  kejadian hujan merupakan selisih antara  $C_{int}$  dan  $S_{int}$  di awal tiap kejadian hujan.  $Ab_{ev}$  ( $Ab$  tiap kejadian hujan) didefinisikan sebagaimana persamaan 13).

$$Ab_{ev} = C_{int} - S_{int}(ddeb(ev)) \quad (13)$$

Keterangan:

$C_{int}$ , kapasitas intersepsi (mm),

$S_{tra}$ , simpanan aktual tangki transfer pada awal ( $deb-ev$ ) kejadian hujan (mm).

Untuk mengetahui nilai-nilai penting dari setiap hasil perhitungan kriteria, dihitung nilai maksimum, rata-rata, median dan minimum untuk semua kriteria retensi ditambah nilai  $q25$  (kuartil 25) dan  $q75$  (kuartil 75) khusus untuk kriteria kejadian hujan. Nilai  $q25$  atau kuartil pertama merupakan batas dimana 25% data pengamatan lebih kecil atau sama dengan nilai  $q25$ . Sedangkan  $q75$  atau kuartil ketiga merupakan batas dimana

75% data pengamatan lebih kecil atau sama dengan nilai  $q_{75}$ .

**Formulasi Alat Bantu Kriteria Rancangan untuk Menilai Kinerja Hidrologis Green Roof**

Model FAVEUR yang telah dikembangkan Berthier (2010) dan Pinta (2012) telah dapat digunakan untuk menganalisis limpasan pada green roof. Akan tetapi, kebutuhan akan kriteria rancangan yang dapat membantu menilai kinerja hidrologis green roof khususnya untuk retensi belum dapat dipenuhi oleh model FAVEUR tersebut. Oleh karena itu, langkah terakhir dari penelitian ini adalah melengkapi model FAVEUR dengan menyusun sebuah alat bantu kriteria rancangan dalam format Excel© yang dapat menggambarkan hubungan antara karakteristik fisik green roof dan kriteria retensi. Untuk merealisasikan tahapan ini, seluruh matriks hasil kriteria retensi dari simulasi ncalc = 500 dikumpulkan sesuai skala waktunya sebagaimana ketiga matriks beserta elemen-elemennya berikut:

1.  $ls\_critere\_sais$  yang merupakan matriks kriteria tahunan dan musiman yang memuat :  $Plu\_an$ ,  $Ab\_an$ ,  $Ab\_ete$ ,  $Ab\_hiver$  ;
2.  $ls\_critere\_ev$  yang merupakan matriks kriteria kejadian hujan dengan curah hujan > 1 mm yang memuat :  $Plu\_ev$ ,  $Ab\_ev$ ,  $qmax\_ev$  ;
3.  $ls\_critere\_evs$  : yang merupakan matriks kriteria kejadian hujan terpilih yang memuat semua elemen matriks kriteria kejadian hujan dengan curah hujannya > 5 mm ;

Selanjutnya, semua matriks dikumpulkan dalam sebuah matriks hasil yang memuat nilai minimum maksimum, rata-rata dan median dari

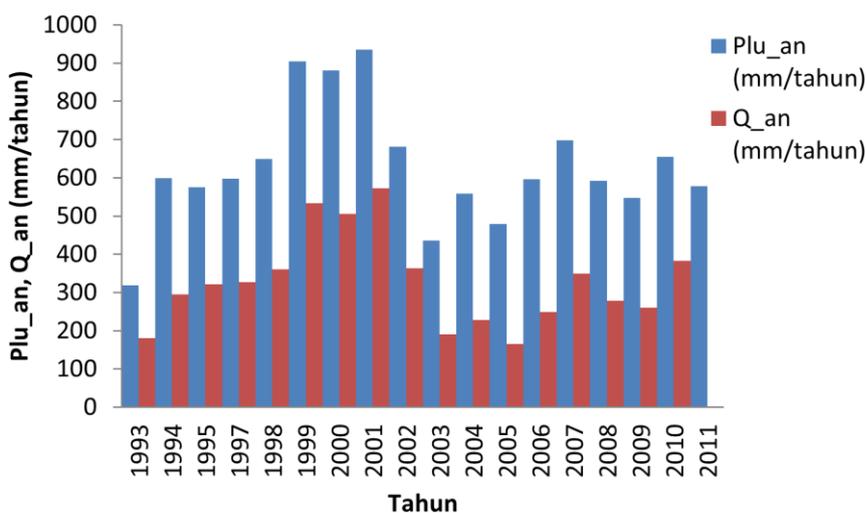
semua elemen dari tiap matriks kriteria. Kemudian disusunlah korelasi antara parameter model bervariasi seperti  $K_{c_{int}}$ ,  $C_{int}$ ,  $C_{tra}$  dan  $T_{tra}$  dengan kriteria retensi green roof. Untuk mencari korelasi dari keempat parameter tersebut dengan semua elemen matriks, digunakan pilihan "multiple regression" pada Matlab©. Persamaan yang diperoleh merupakan persamaan dengan variabel lebih dari satu (multi variable). Persamaan yang didapat akan dianggap tepat jika koefisien korelasi ( $R^2$ ) mendekati 1.

Kriteria yang diperoleh dari hasil persamaan tersebut kemudian dibandingkan dengan kriteria model. Persamaan dikatakan tepat jika kriteria persamaan mendekati linear dengan kriteria model. Analisis regresi ini dapat juga menunjukkan parameter yang lebih dominan terhadap tiap kriteria. Dalam hal ini, digunakan bantuan basic fitting dari Matlab ©. Jika diperoleh korelasi yang baik antara kriteria hidrologis dengan hanya salah satu parameter model, maka parameter model tersebut dapat digunakan sebagai variabel untuk menyusun persamaan linear atau polinomial dengan kriteria hidrologis, Untuk menguji validitas persamaan tersebut, dilakukan perbandingan yang sama dengan kriteria model.

**HASIL DAN PEMBAHASAN**

**Limpasan Q**

Simulasi model FAVEUR untuk ncalc =1 dengan data masukan berupa  $Plu_1$  (curah hujan (mm/dT1)), ETP1 (evapotranspirasi potensial (mm/dT1)) serta nilai keempat parameter model FAVEUR dalam hal ini parameter untuk green roof



Gambar 4 Grafik  $Plu\_an$  dan  $Q\_an$  (mm / tahun) untuk periode 1993-2011

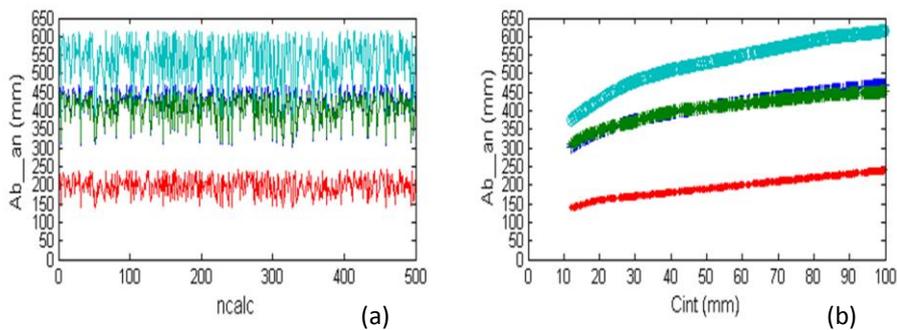
referensi ( $C_{int} = 12 \text{ mm}$ ,  $K_{cint} = 1$ ,  $C_{tra} = 10 \text{ mm}$  dan  $T_{tra} = 1000 \text{ mm}$  (Tabel 2)) menghasilkan nilai  $Q_1$  (limpasan green roof dalam mm tiap interval waktu  $dT_1$ ).  $Q_1$  (mm/300 detik) kemudian ditampilkan dalam bentuk  $Q_{an}$  (limpasan tahunan, mm/tahun) untuk dibandingkan dengan  $Plu_{an}$  (curah hujan tahunan, mm/tahun) seperti yang ditunjukkan pada Gambar 4.  $Q_{an}$  menggambarkan limpasan pada green roof referensi dengan karakteristik fisik sebagai berikut : jenis vegetasi sedum dan ketebalan substrat 3 cm dan kapasitas air maksimum (CME) 40% dengan luasan  $37.5 \text{ m}^2$

Berdasarkan Gambar 4, nilai  $Q_{an}$  berkisar antara 165.7-572.6 mm/tahun sedangkan nilai  $Plu_{an}$  berkisar antara 318.8-935.8 mm/tahun dan dapat disimpulkan bahwa nilai  $Q_{an}$  lebih kecil dibanding  $Plu_{an}$ . Dari perbandingan keseluruhan jumlah  $Q_1$  dan  $Plu_1$ , dapat diketahui pada simulasi ini bahwa penurunan limpasan pada green roof referensi ini mencapai 51% dari total curah hujan tahunan. Seperti diketahui bahwa kurva laju dan volume limpasan dari sebuah atap tanpa vegetasi akan relatif sama atau mendekati kurva curah hujan (Baskaran dan Bass 2001). Limpasan yang terjadi pada atap tanpa vegetasi sangat jauh lebih besar dibanding pada green roof. Adapun sebagian kecil limpasan yang lebih tinggi dari nilai curah hujan disebabkan oleh simpanan air aktual di awal kejadian hujan dipengaruhi oleh curah hujan sebelumnya (Palla et al. 2009). Pengurangan limpasan pada green roof ini disebabkan oleh keberadaan green roof yang terbukti dapat mengurangi air limpasan karena adanya peningkatan penyimpanan air pada substrat dan evapotranspirasi pada vegetasi (Mentens et al. 2006). Namun, model FAVEUR yang digunakan untuk simulasi pada penelitian ini masih dalam tahap pengembangan sehingga dalam hal ini belum

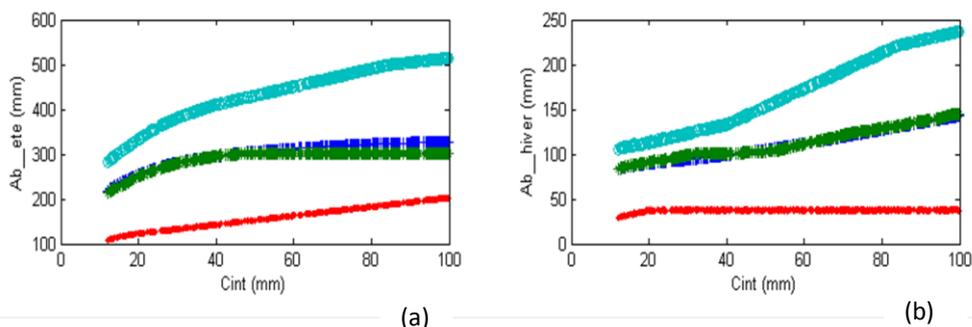
memiliki perangkat untuk menghitung  $Q_1$  pada atap tanpa vegetasi. Oleh sebab itu, untuk dapat membandingkan perbedaan limpasan pada green roof dan pada atap biasa, diperlukan simulasi  $Q_1$  pada atap tanpa vegetasi dengan kondisi iklim serta luasan area yang sama.

**Hubungan Kriteria Hidrologis Green Roof Variasi Parameter Model dengan  $C_{int}$**

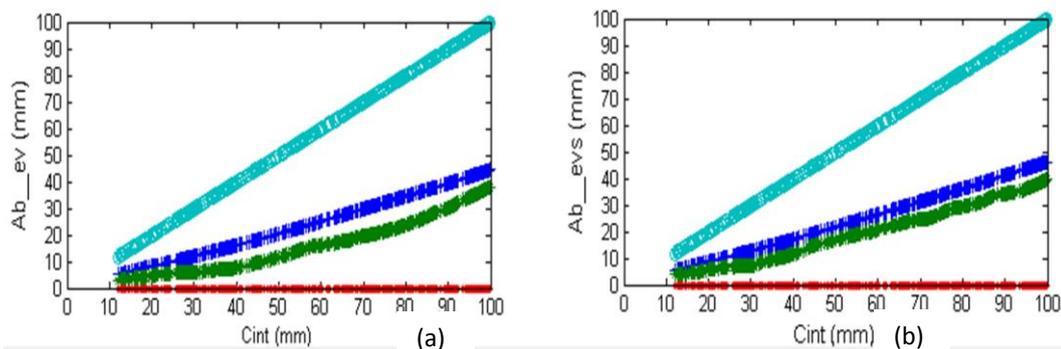
Seperti telah diketahui sebelumnya bahwa ada 4 parameter model FAVEUR yang divariasikan secara acak dalam simulasi  $n_{calc} = 500$  yaitu  $C_{int}$  [12;100],  $K_{cint}$  (1 atau 1.2),  $C_{tra}$ [10;100] dan  $T_{tra}$ [10;1000]. Untuk mengembangkan model FAVEUR dalam penilaian kinerja retensi green roof, terlebih dahulu diperlukan korelasi antara kriteria retensi dengan ketempat parameter bervariasi tersebut. Setelah kriteria retensi dan keempat parameter tersebut dihubungkan, ternyata hanya parameter  $C_{int}$  yang memiliki korelasi yang kuat dengan kriteria retensi  $Ab$ . Hal ini karena peningkatan retensi pada green roof merupakan fungsi dari kapasitas simpannya dan siklus curah hujan-evapotranspirasi (Uhl dan Schiedt 2008). Oleh sebab itu, dalam hal ini hanya akan ada korelasi fungsi kriteria retensi ( $Ab$ ) dalam  $ls\_critere\_sais$ ,  $ls\_critere\_ev$  dan  $ls\_critere\_evs$  terhadap  $C_{int}$ . Gambar retensi tahunan, musiman dan kejadian hujan hasil simulasi  $n_{calc} = 500$  serta hubungannya terhadap  $C_{int}$  dapat dilihat pada Gambar 5-7. Adapun fungsi evapotranspirasi yang dalam hal ini direpresentasikan oleh parameter  $K_{cint}$  tidak dapat disajikan juga pada Gambar 5-7 karena hanya ada 2 parameter  $K_{cint}$  yaitu  $K_{cint}$  sedum dan  $K_{cint}$  rumput. Oleh karena itu, hubungan antara  $K_{cint}$  dan kriteria hidrologis hanya dapat dilihat dengan melakukan simulasi berbeda dengan masing-masing nilai  $K_{cint}$  yang berbeda.



**Gambar 5** Kurva  $CR_{an}$  dan  $Ab_{an}$  serta fungsi terhadap  $C_{int}$  untuk  $n_{calc} = 500$



**Gambar 6** Kurva CR dan Ab musiman terhadap  $C_{int}$  untuk  $n_{calc} = 500$



**Gambar 7** Kurva CR dan Ab kejadian hujan dan kejadian hujan terpilih serta fungsinya terhadap  $C_{int}$  untuk  $n_{calc} = 500$

Pada Gambar 5 dapat dilihat distribusi retensi tahunan ( $Ab_{an}$ ) maksimum, rata-rata, median dan minimum) untuk 500 ncalc (a) dan kurva Ab terhadap  $C_{int}$  (b). Berdasarkan Gambar 5 dapat dilihat bahwa  $Ab_{an}$  minimum bervariasi antara 138 - 240 mm,  $Ab_{an}$  maksimum antara 375 dan 614 mm,  $Ab_{an}$  rata-rata antara 301-470 mm dan  $Ab_{an}$  median antara 309-451 mm. Secara umum dapat dinyatakan juga bahwa  $Ab_{an}$  minimum setara dengan 22-38% dari total curah hujan,  $Ab_{an}$  maksimum setara dengan 60-98 % dari total curah hujan,  $Ab_{an}$  rata-rata setara dengan 48-75% dari total curah hujan dan  $Ab_{an}$  median setara dengan 49-72% dari total curah hujan. Sedangkan salah satu hasil penelitian menyimpulkan bahwa *green roof* dapat menyerap air hujan hingga 75% (Stifter 1997).

Dalam hal ini, hasil simulasi menyajikan nilai dan persentase Ab yang lebih spesifik dibanding pada referensi. Hal ini dikarenakan penelitian terkait kriteria retensi masih sangat jarang. Oleh sebab itu, hasil simulasi dengan variasi  $n_{calc} = 500$  dapat menunjukkan gambaran bahwa nilai dan juga persentase  $Ab_{an}$  sangat bervariasi.

Untuk hubungan dengan  $C_{int}$ , nilai Ab berbanding lurus terhadap  $C_{int}$ . Semakin tinggi nilai  $C_{int}$ , semakin tinggi pula nilai Ab. Seperti yang telah dijelaskan sebelumnya bahwa  $C_{int}$  yang merupakan

kapasitas intersepsi bertindak sebagai sebuah ruangan penyimpanan dimana semakin luas ruang penyimpanan ( $C_{int}$  tinggi) akan semakin banyak air yang dapat tersimpan (Berthier dan Ramier 2010).

Selanjutnya, pada Gambar 6 dapat dilihat kurva  $Ab_{ete}$  (retensi musim panas ) terhadap terhadap  $C_{int}$  (a) dan kurva  $Ab_{hiver}$  (retensi musim dingin terhadap  $C_{int}$  (b)).  $Ab_{ete}$  minimum bervariasi antara 109-203 mm (17-32% dari curah hujan tahunan) sedangkan  $Ab_{ete}$  maksimum berkisar antara 282 - 514 mm (45-82% dari curah hujan tahunan).  $Ab_{ete}$  rata-rata berkisar antara 218-327 mm (35-52% dari curah hujan tahunan) dan  $Ab_{ete}$  median antara 213-302 mm (34-48% dari curah hujan tahunan).  $Ab_{hiver}$  minimum bervariasi antara 29-38 mm (5-6% dari curah hujan tahunan) sedangkan  $Ab_{hiver}$  maksimum berkisar antara 106-237 mm (17-38% dari curah hujan tahunan).  $Ab_{hiver}$  rata-rata berkisar antara 84-143 mm (13-23% dari curah hujan tahunan) dan  $Ab_{hiver}$  median antara 84-145 mm (13-23% dari curah hujan tahunan).

Pada Gambar 6 (a dan b), dapat dilihat bahwa  $Ab_{ete}$  dan  $Ab_{hiver}$  berbanding lurus terhadap  $C_{int}$ . Dari Gambar 6 dapat diketahui bahwa pada musim panas, nilai Ab lebih tinggi dan sebaliknya pada musim dingin, Ab lebih rendah. Hal tersebut senada dengan yang dinyatakan Minke

dan Witter (1982) bahwa secara umum tingkat retensi pada *green roof* selama musim panas bervariasi antara 70-100% sedangkan pada musim dingin antara 40-50%, tergantung pada desain *green roof* dan kondisi cuaca. Dalam dalam hal ini, hasil simulasi menunjukkan perbandingan yang lebih detail terkait nilai maksimum, minimum, rata-rata dan median. Selain itu Uhl dan Schiedt (2008) menyatakan pembagian musim sebagai berikut: periode musim panas( 1 Mei - 30 September), pertengahan musim antara musim semi dan gugur (15 Maret - 30 April) dan periode musim dingin (15 November - 15 Maret) menunjukkan bahwa limpasan yang terjadi pada musim panas lebih kecil dibanding pada musim lainnya. Hal ini disebabkan evapotranspirasi yang lebih tinggi pada musim panas menyebabkan kapasitas simpan juga akan lebih tinggi meskipun curah hujan tinggi (Uhl dan Schiedt 2008).

Pada Gambar 7 hubungan antara Ab terhadap  $C_{int}$  digambarkan dalam skala kejadian hujan (a) dan kejadian hujan terpilih (b) untuk 500 ncalc. Simulasi kejadian hujan yang diperoleh dapat menggambarkan perubahan Ab dari satu kejadian hujan ke kejadian hujan berikutnya dan tidak dapat memperlihatkan perubahan Ab di awal dan akhir pada sebuah kejadian hujan. Pada skala kejadian hujan, Ab<sub>ev</sub> dan Ab<sub>evs</sub> maksimum selalu berbanding lurus dengan  $C_{int}$  dalam interval 12-100 mm. Sebaliknya, Ab<sub>ev</sub> dan Ab<sub>evs</sub> minimum selalu sama dengan 0. Ab<sub>ev</sub> rata-rata berkisar antara 5.13-44.46 mm sedangkan Ab<sub>ev</sub> median antara 3.12-38.12 mm. Untuk Ab<sub>evs</sub>, diperoleh nilai Ab<sub>evs</sub> minimum selalu sama dengan 0, Ab<sub>evs</sub> maksimum selalu berbanding lurus dengan  $C_{int}$  dalam interval 0-100 mm, Ab<sub>evs</sub> rata-rata antara 5.39-46.24 mm dan Ab<sub>evs</sub> median antara 3.98-39.83 mm. Ab<sub>ev</sub> rata-rata selalu berbanding lurus dengan  $C_{int}$  akan tetapi nilai Ab<sub>evs</sub> median yang sulit untuk dijelaskan. Kurva Ab<sub>ev</sub> median meningkat ketika  $C_{int}$  meningkat namun tidak linear.

Variasi Ab antara 0 dan nilai maksimumnya yang diperoleh dari hasil simulasi senada dengan Hilten *et al.* (2008) yang menyatakan bahwa *green*

*roof* dapat mengurangi limpasan, namun variasi nilai koefisien limpasan sangat besar sekali yaitu antara 0-1. Oleh karena itu perlu dilakukan pengamatan limpasan dan retensi langsung pada satu kejadian hujan. Menurut Carter dan Rasmussen (2007), nilai retensi maksimum dari sebuah kejadian hujan terjadi pada awal kejadian hujan.

**Pengembangan Alat Bantu Kriteria Rancangan untuk Penilaian Kinerja Retensi Green Roof**

Tahapan terakhir dari penelitian ini adalah menyusun sebuah alat bantu rancangan kriteria sederhana berdasarkan persamaan yang memuat hubungan kriteria retensi *green roof* dengan karakteristik fisik *green roof*. Tools ini akan disusun dalam format Excel© yang menunjukkan nilai statistik kriteria *green roof* seperti nilai minimum, rata-rata, median, maksimum, q25 dan q75. Perhitungan pada *file* tersebut dimulai dengan mengisi nilai karakteristik fisik *green roof* yaitu dengan cara berikut :

1. CME: dapat diisi dengan CME yang diinginkan dalam %.
2. Ketebalan substat : dapat diisi dengan ketebalan substrat yang diinginkan dalam cm
3. Jenis tutupan vegetasi : "S" untuk sedum dengan  $K_{cint} = 1$  atau "G" untuk rumput (*graminée*) dengan  $K_{cint} = 1.2$

Selanjutnya berdasarkan informasi dasar tersebut, nilai  $C_{int}$  dari *green roof* dapat dihitung berdasarkan persamaan (1) dan (2). Dengan nilai  $C_{int}$ , nilai kriteria CR dan Ab tahunan, musiman dan kejadian hujan dapat diperoleh secara langsung berdasarkan persamaan fungsi kriteria terhadap  $C_{int}$  yang telah terintegrasi dalam *file* tersebut.

Hasil perhitungan kriteria retensi dari alat bantu kriteria rancangan dalam format Excel© dengan contoh variasi CME dan ketebalan substrat serta jenis vegetasi disajikan pada Gambar 8 dan 9. Dengan melihat hasil tersebut, jenis *green roof* yang akan diaplikasikan pada suatu tempat dapat ditentukan sesuai dengan kinerja retensi *green roof* yang telah diketahui.

Parameter green roof		KRITERIA HIDROLOGIS GREEN ROOF					
		Ab	Ab <sub>an</sub> (mm)	Ab <sub>ete</sub> (mm)	Ab <sub>hiver</sub> (mm)	Ab <sub>ev</sub> >1mm (mm)	Ab <sub>evs</sub> >5mm (mm)
CME substrat (%)	30	Minimum	149.4	115.1	32.8	0.0	0.0
Ketebalan substrat (cm)	10	Rata-rata	322.8	233.7	86.5	6.1	6.6
Jenis vegetasi (S ou G)	S	Median	327.4	227.9	87.0	3.9	4.1
<b>Cint (mm)</b>	15	Maksimum	402.0	302.7	108.8	14.8	14.8
		q25	-	-	-	0.5	0.5
		q75	-	-	-	13.6	15.7

**Gambar 8** Hasil perhitungan dengan alat bantu kriteria rancangan kinerja hidrologis *green roof* dalam format Excel© untuk CME 30%, ketebalan substrat = 10 cm dan jenis vegetasi "S"

Parameter <i>green roof</i>		KRITERIA HIDROLOGIS <i>GREEN ROOF</i>					
		Ab	Ab_an (mm)	Ab_ete (mm)	Ab_hiver (mm)	Ab_ev >1mm (mm)	Ab_ets >5mm (mm)
CME substrat (%)	20	Minimum	134.6	97.7	14.4	0.0	0.0
Ketebalan substrat (cm)	3	Rata-rata	282.8	184.9	77.8	2.8	3.2
Jenis vegetasi (S ou G)	S	Median	289.9	169.6	81.5	3.4	2.2
Cint (mm)	6	Maksimum	343.7	222.9	97.7	5.8	5.8
		q25	-	-	-	0.4	0.4
		q75	-	-	-	5.5	5.8

**Gambar 9** Hasil perhitungan dengan alat bantu kriteria rancangan kinerja hidrologis *green roof* dalam format Excel© untuk CME 20%, ketebalan substrat = 3 cm dan jenis vegetasi “S”

Pada Gambar 8 disajikan hasil perhitungan kriteria retensi dari alat bantu kriteria rancangan dengan CME substrat 30 %, ketebalan substrat 10 cm dan jenis vegetasi “S”. Berdasarkan karakteristik fisik *green roof* tersebut, didapatkan nilai Cint = 15 mm. Dengan nilai Cint = 15 mm, diperoleh : Ab\_an\_maksimum = 402 mm, Ab\_ete\_maksimum = 302.7 mm, Ab\_hiver\_maksimum = 108.8 mm, Ab\_ev\_maksimum = 14.8 mm, Ab\_ev\_q75 = 13.6 mm , Ab\_ets\_maksimum = 14.8 mm, Ab\_ets\_q75 = 15.7 mm.

Pada Gambar 9 disajikan hasil perhitungan kriteria retensi dari model operasional FAVEUR *green roof* dalam dokumen Excel© dengan CME substrat 20 %, ketebalan substrat 3 cm dan jenis vegetasi “S”. Berdasarkan karakteristik fisik *green roof* tersebut, didapatkan nilai C<sub>int</sub> = 6 mm. Dengan nilai C<sub>int</sub> = 6 mm, diperoleh nilai Ab maksimum diperoleh nilai Ab\_an\_maksimum = 343.7 mm, Ab\_ete\_maksimum = 222.9 mm, Ab\_hiver\_maksimum = 97.7 mm, Ab\_ev\_maksimum = 5.8 mm, Ab\_ev\_q75 = 5.5 mm , Ab\_ets\_maksimum = 5.8 mm, Ab\_ets\_q75 = 5.8 mm.

Berdasarkan model operasional *green roof* dalam dokumen Excel© seperti yang telah ditunjukkan pada Gambar 8 dan 9, dapat disimpulkan bahwa semakin besar CME substrat dan semakin tinggi ketebalan substrat, maka nilai Ab secara keseluruhan akan semakin tinggi. Akan tetapi, ternyata ketebalan substrat hanya berpengaruh dalam interval 0-5 cm (Bethier dan Ramier 2010). Jika ketebalan lebih besar dari 5, hanya CME yang akan menjadi karakteristik fisik yang mempengaruhi Ab.

Meskipun demikian, alat bantu kriteria rancangan ini hanya menggambarkan kondisi retensi *green roof* pada daerah beriklim kontinental seperti wilayah studi Ile de France, Prancis. Oleh sebab itu, penambahan analisis kriteria retensi *green roof* untuk jenis iklim yang berbeda seperti iklim mediterania, iklim tropis dan sebagainya sangat penting agar model ini dapat diterapkan di banyak tempat.

## KESIMPULAN

Hasil analisis limpasan dengan Model FAVEUR *green roof* referensi menunjukkan bahwa *green roof* dapat menurunkan limpasan (Q<sub>an</sub>) menjadi 51% dari total curah hujan (Plu<sub>an</sub>).

Variasi parameter model FAVEUR untuk skala tahunan, musiman dan kejadian hujan menghasilkan:

Kriteria retensi tahunan dan musiman berbanding lurus terhadap kapasitas intersepsi dengan kisaran retensi rata-rata tahunan antara 48-75%, musim panas antara 35-52% dan musim dingin antara 13-23% dari total curah hujan tahunan,

Kriteria retensi kejadian hujan (Ab<sub>ev</sub>) maksimum selalu berbanding lurus dengan kapasitas intersepsi dalam interval variasi 12-100 mm. Kriteria retensi kejadian hujan minimum selalu sama dengan 0. Kriteria retensi kejadian hujan rata-rata selalu berbanding lurus dengan kapasitas intersepsi.

Sebuah alat bantu kriteria rancangan yang memuat hubungan antara karakteristik fisik *green roof* dengan kapasitas intersepsidan kriteria retensi *green roof* dengan kapasitas intersepsi telah berhasil disusun. Alat bantu ini disusun dengan menggunakan bantuan *software* Matlab© dan hasilnya disajikan dalam format Excel©. Alat bantu ini sangat mudah digunakan karena hanya dengan memasukkan input 3 karakteristik fisik *green roof* seperti jenis vegetasi, ketebalan substrat dan kapasitas air maksimum (CME) substrat, maka nilai kriteria retensi *green roof* akan diperoleh.

Untuk dapat membandingkan perbedaan limpasan pada *green roof* dan pada atap biasa, diperlukan simulasi limpasan pada atap tanpa vegetasi dengan kondisi iklim serta luasan area yang sama.

Perlu dilakukan pengamatan limpasan dan retensi langsung pada satu kejadian hujan.

Penambahan analisis kriteria retensi *green roof* untuk jenis iklim yang berbeda seperti iklim mediterania, iklim tropis dan sebagainya sangat

penting agar alat bantu kriteria rancangan ini dapat diterapkan di banyak tempat.

## DAFTAR PUSTAKA

- Baskaran B, Bass B. 2001. *Evaluating rooftop and vertical gardens as an adaptation strategy for urban areas*. Canada(CN) : National Research Council Canada.
- Berthier E, Gouvello de B, Gallis D. 2010. Bilan hydrique des toitures végétalisées : vers de meilleures compréhensions et modélisation hydrological budget of green roof : contributions to a better understanding and simulation. *Journal of Novatech*. 1–10.
- Berthier E, Ramier D. 2010. Bibliographie et plan d'expérience sur le comportement hydrique des toitures végétalisées. *Rapport de technique du projet TVGEP partie 2, livrable L21*. Trappes (FR) : Centre d'Etudes Techniques de l'Équipement Ile de France.
- [ADIVET ] l'Association des Toitures Végétales. 2007. Règles Professionnelles pour la conception et la réalisation des terrasses et toitures végétalisées. *Document de travail de l'ADIVET, la CSFE, le SNFE et l'UNEP Edition de No.2 November 2007*. Montrouge (FR) : Association pour le Développement et l'Innovation en Végétalisation Extensive de Toiture.
- Carter TL, Rasmussen TC. 2007. Hydrologic behavior of vegetated roofs. *Journal of the American Water Resources Association*. 42: 1261 – 1274.
- Dunnett N, Kingsbury N. 2004. *Planting Green Roofs and Living Walls*. Portland (US) : Timber Press.
- FAO (Food and Agricultural Organisation). 2000. *Crop evapotranspiration (guidelines for computing crop water requirements)*. FAO Irrigation and Drainage Paper. Vol : 56.
- Gouvello D, Christophe L. 2009. TVGEP: Conception des toitures végétalisées pour la gestion des eaux pluviales. *Rapport de technique du projet TVGEP*. Champs sur Marne (FR) : le Centre Scientifique et Technique du Bâtiment.
- Hiltner RN, Lawrence TM, Tollner, EW. 2008. Modeling stormwater runoff from green roofs with HYDRUS-1D. *Journal of Hydrology*. 358 : 288-293.
- Lassalle F. 2008. *Végétalisation extensive des terrasses et toitures*. Le Moniteur. 243p.
- Mentens J, Raes D, Hermy M. 2006. Green roofs as a tools for solving the rainwater runoff problem in the urbanized 21st century. *Journal of Landscape and Urban Planning*. 77(3) : 217–226.
- Minke G, Witter G. 1982. *Haeuser mit Gruenem Pelz, Ein Handbuch zur Hausbegruenung*. Frankfurt (DE) : Verlag Dieter Fricke GmbH.
- Palla A, Gnecco I, Lanza LG. 2009. Unsaturated 2D modelling of subsurface water flow in the coarse-grained porous matrix of a green roof. *Journal of Hydrology*. 379(1-2) : 193–204.
- Pinta P. 2012. Définition et validation d'un modèle réservoir pour la modélisation du comportement hydrique des toitures végétalisées. *Memoire de Stage*. Champe sur Marne (FR) : Ecole Nationale Ponts et Chaussées.
- Ramier D, Gallis D, Dussuchale A, Pinta P, Versini PA, Gouvello de B. 2013. *Analyse du fonctionnement hydrologique des toitures végétalisées: observations et modélisation*. Nantes (FR) : Colloque INOGEDEP.
- Stifter R. 1997. *Greenery on the Roof: a Futuristic, Ecological Building Method For a More Human Architecture in Harmony with Nature*. Hundertwasser Architecture Benedikt Taschen Berlag GmbH Cologne. 156-158.
- Uhl M, Schiedt L. 2008. *Green roof water retention - monitoring results*. Edinburgh (UK) : In 11<sup>th</sup> International Conference on Urban Drainage