

Bidang Unggulan PT : Infrastruktur

Kode>Nama Rumpun Ilmu : 421/ Teknik Sipil

LAPORAN AKHIR TAHUN
PENELITIAN UNGGULAN PERGURUAN TINGGI
The Development and Upgrading of Seven Universities
In Improving the Quality and Relevance of
Education in Indonesia



**PENERAPAN KONSEP “WATER SENSITIVE URBAN DESIGN” SEBAGAI
SISTEM DRAINASE BERWAWASAN LINGKUNGAN DI KOTA MANADO**

Tahun ke 1 dari rencana 2 tahun

Ir. Isri Ronald Mangangka, M.Eng., Ph.D.
NIDN : 0024096505

Dr.Eng. Pingkan Peggy Egam, ST. MT.
NIDN : 0002027206

Ir. Hansye Jeki Tawas, M.Agr.
NIDN : 0008125807

UNIVERSITAS SAM RATULANGI

NOVEMBER 2016

HALAMAN PENGESAHAN

Judul : Penerapan Konsep “Water Sensitive Urban Design”
Sebagai Sistem Drainase Berwawasan Lingkungan di Kota
Manado

Peneliti/Pelaksana
Nama Lengkap : Ir. ISRI RONALD MANGANGKA M.Eng., Ph.D.
Perguruan Tinggi : Universitas Sam Ratulangi
NIDN : 0024096505
Jabatan Fungsional : Lektor Kepala
Program Studi : Teknik Sipil
Nomor HP : 081242865495
Alamat surel (e-mail) : isrimangangka@hotmail.com

Anggota (1)
Nama Lengkap : PINGKAN PEGGY EGAM
NIDN : 0002027206
Perguruan Tinggi : Universitas Sam Ratulangi

Anggota (2)
Nama Lengkap : HANSYE JEKI TAWAS
NIDN : 0008125807
Perguruan Tinggi : Universitas Sam Ratulangi
Institusi Mitra (jika ada) : -
Nama Institusi Mitra : -
Alamat : -
Penanggung Jawab : -
Tahun Pelaksanaan : Tahun ke 1 dari rencana 2 tahun
Biaya Tahun Berjalan : Rp 130.000.000,00
Biaya Keseluruhan : Rp 300.000.000,00

Mengetahui,
Direktur Eksekutif PIU Unsrat



(Prof. Ir. M.D.J. Sumajouw, M.Eng, Ph.D.)
NIP/NIK 195812171988031002

Manado, 29 - 11 - 2016
Ketua,

(Ir. ISRI RONALD MANGANGKA M.Eng.,
Ph.D.)
NIP/NIK 196509241993031003

Menyetujui,
Ketua LP2M Unsrat

(Prof.Dr.Ir. Inneke F.M. Rumengan, MSc)
NIP/NIK 195711051984032001

RINGKASAN

Masalah banjir dan kerusakan lingkungan merupakan konsekuensi dari pembangunan. Dampak tersebut termasuk perubahan terhadap kualitas air hujan maupun kuantitasnya (Goonetilleke et al. 2005; Prakash 2005; Wong 2006). Hal ini disebabkan karena bertambahnya bagian permukaan lahan yang kedap air dan meningkatnya aktivitas kehidupan manusia yang menambah produksi berbagai jenis limbah (Herngren et al. 2006). Kota Manado merupakan kota yang strategis dan memiliki perkembangan dan tingkat pertumbuhan penduduk dan ekonomi yang sangat pesat. Dalam kurun waktu kurang dari dua dasawarsa, lebih dari 50 ha kawasan bisnis baru telah dikembangkan melalui upaya reklamasi Pantai Manado. Demikian pula manjamurnya pembangunan wilayah pemukiman baru dalam sepuluh tahun terakhir ini telah menyebabkan perubahan fungsi lahan Kota Manado yang sangat signifikan. Melejitnya pembangunan dan pembukaan lahan baru baik untuk kawasan ekonomi/bisnis maupun kawasan pemukiman secara signifikan mengakibatkan penurunan kualitas lingkungan hidup (environmental degradation).

Penerapan sistem drainase yang berwawasan lingkungan yang merupakan komponen dari model pembangunan perkotaan (urban development) yang modern dan berwawasan lingkungan sangat diperlukan untuk mewujudkan Visi Kota Manado yaitu “Manado Kota Model Ekowisata”. Water Sensitive Urban Design (WSUD) merupakan salah satu konsep penanganan air hujan yang berwawasan lingkungan yang dapat menggantikan sistem drainase konvensional.

Tujuan penelitian ini adalah untuk mengevaluasi dan mengidentifikasi areal/kawasan pembangunan baru (kawasan bisnis/komersial dan kawasan pemukiman) dimana Konsep WSUD dapat diterapkan untuk menggantikan sistem drainase konvensional. Identifikasi difokuskan untuk menetapkan komponen struktur WSUD apa saja yang tepat untuk diaplikasikan pada setiap areal/kawasan pembangunan baru. Konsep WSUD yang dipilih kemudian dievaluasi kesesuaiannya dengan komponen-komponen lain dalam model pembangunan perkotaan (urban development) yang berwawasan lingkungan. Luaran yang akan dihasilkan pada tahun pertama adalah berupa Pra-desain Sistem Drainase Berwawasan Lingkungan menggunakan Konsep WSUD. Pra-desain ini kemudian akan ditawarkan kepada pengembang untuk didetailkan. Tujuan akhir dari penelitian ini (yaitu pada akhir tahun kedua) adalah untuk menghasilkan produk berupa Detail Desain Sistem Drainase Berwawasan Lingkungan menggunakan Konsep WSUD, yang dapat dibangun oleh pengembang.

Penelitian ini bekerjasama dengan para pengembang yang ada di Kota Manado. Investigasi dan Identifikasi dilakukan pada setiap kawasan pengembangan tersebut. Investigasi diawali dengan desk studi, yaitu berdasarkan gambar-gambar perencanaan yang dimiliki oleh para pengembang. Investigasi dilanjutkan dengan survey lapangan untuk melakukan pengamatan secara visual. Pada survey lapangan ini, dilakukan klarifikasi dan pengukuran-pengukuran untuk mendapatkan dimensi-dimensi yang benar sesuai kondisi di lapangan. Konsultasi dengan para pengembang tetap dibutuhkan hingga diperoleh Pra-desain dan Detail Desain Sistem Drainase Berwawasan Lingkungan Menggunakan Konsep WSUD.

Laporan Akhir Tahun ini berisi hasil-hasil dan luaran yang telah dicapai selama tahun 2016 ini dan rencana lanjutan kegiatan tahun 2017

Kata kunci: Drainase berwawasan lingkungan, water sensitive urban design, WSUD

PRAKATA

Puji syukur kita panjatkan ke hadirat Tuhan Yang Maha Esa, karena berkat tuntunannya kegiatan Penelitian dengan Judul “Penerapan Konsep ‘Water Sensitive Urban Design’ sebagai Sistem Drainase Berwawasan Lingkungan di Kota Manado” dapat terlaksana dengan baik.

Melalui kesempatan ini kami selaku Tim Peneliti mengucapkan banyak terima kasih kepada Rektor Universitas Sam Ratulangi, Prof. Dr. Ir. Ellen Joan Kumaat, MSc., DEA, kepada Ketua Lembaga Penelitian dan Pengabdian Kepada Masyarakat (LPPM) Universitas Sam Ratulangi, Prof. Dr. Ir. Inneke F. M. Rumengan, MSc. dan kepada Dekan Fakultas Teknik Universitas Sam Ratulangi, Prof. Dr. Ir. Jeffrey I. Kindangen, DEA, yang sudah memberi kesempatan kepada Tim Peneliti ini untuk melaksanakan kegiatan penelitian ini. Kami juga menyampaikan terima kasih kepada para developer, yang sudah mendukung terlaksananya kegiatan penelitian ini.

Kegiatan penelitian ini telah selesai untuk Tahun I dengan dihasilkannya pra-design perencanaan drainase berwawasan lingkungan mengaplikasikan konsep Water Sensitive Urban Design (WSUD) di beberapa lokasi pengembangan. Kegiatan penelitian ini juga telah menghasilkan luaran berupa makalah yang dipresentasikan pada Konferensi Internasional SICEST 2016 dan book chapter yang diterbitkan oleh SPRINGER Internasional.

Akhir kata, semoga luaran yang dihasilkan dari kegiatan penelitian ini dapat bermanfaat bagi kita semua.

Manado, November 2016

Ketua Tim Peneliti,

Ir. Isri Ronald Mangangka, M.Eng., Ph.D.

NIP. 19650924 1993031 003

DAFTAR ISI

HALAMAN PENGESAHAN.....	ii
RINGKASAN	iii
PRAKATA.....	iv
DAFTAR ISI.....	v
DAFTAR TABEL	vii
DAFTAR GAMBAR.....	viii
DAFTAR LAMPIRAN.....	ix
BAB 1. PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Rumusan Masalah	2
BAB 2. TINJAUAN PUSTAKA.....	4
2.1 Gross Pollutant Traps	5
2.2 Vegetated Swales, Filter Strips dan Bioretention Swales	6
2.2.1 Vegetated Swales	6
2.2.2 Filter Strips.....	6
2.2.3 Bioretention Swales	6
2.3 Detention, Retention Ponds/Basins	7
2.4 Infiltration Systems	7
2.5 Bioretention Basins	8
2.6 Cosntructed Wetlands	8
BAB 3. TUJUAN DAN MANFAAT PENELITIAN	9
3.1 Tujuan Penelitian	9
3.2 Manfaat/Urgensi Penelitian.....	9
3.3 Hasil yang Ditargetkan dan Kontribusi Terhadap Ilmu Pengetahuan.....	9
BAB 4. METODE PENELITIAN.....	11
4.1 Lokasi Penelitian	11

4.2 Peta Jalan (Road Map)	11
4.3 Tahapan Penelitian	13
4.4 Luaran	15
BAB 5. HASIL DAN LUARAN YANG DICAPAI	17
5.1 Pemilihan Obyek Penelitian	17
5.1.1 Penetapan Obyek dan Variabel Evaluasi	19
5.1.2 Matriks Evaluasi.....	20
5.2 Analisa Hidrologi	22
5.2.1 Uji Data Hujan Outlier	23
5.2.2 Analisis Curah Hujan Rancangan	25
5.3 Aplikasi Komponen WSUD pada Lokasi-lokasi Pengembangan	29
5.4 Kemajuan Pekerjaan yang Telah dicapai	31
5.5 Luaran yang Telah dicapai	33
BAB 6. RENCANA TAHAPAN BERIKUTNYA	35
6.1 Rencana Tahapan Pelaksanaan Tahun II.....	35
6.2 Rencana Luaran Tahun II.....	36
BAB 7. Kesimpulan dan Saran	38
7.1 Kesimpulan	38
7.2 Saran.....	38
DAFTAR PUSTAKA.....	39
LAMPIRAN-LAMPIRAN	41

DAFTAR TABEL

Tabel 1: Matriks Analisa MCDM.....	20
Tabel 2: Penetapan Obyek Berdasarkan Urutan Ranking.....	21
Tabel 3. Curah Hujan Harian Maksimum Stasiun Klimatologi Kayuwatu	23
Tabel 4. Perhitungan Outlier Data Hujan Stasiun Kayuwatu	24
Tabel 5. Perhitungan Curah Hujan Rancangan Dengan Menggunakan Distribusi Gumbel Tipe I.....	26
Tabel 6. Perhitungan Curah Hujan Rancangan Dengan Menggunakan Distribusi Log Normal Dua Parameter.....	27
Tabel 7. Curah Hujan Rancangan Dengan Distribusi Log Pearson Tipe III	28
Tabel 8. Rekapitulasi Curah Hujan Rancangan Tiap Metode.....	28
Tabel 9: Komponen WSUD untuk Masing-masing Lokasi Pengembangan	29
Tabel 10: Progres Pekerjaan	31
Tabel 11: Progres Luaran yang Telah Dicapai	33

DAFTAR GAMBAR

Gambar 1: Peta Jalan (Road Map) Penelitian	12
Gambar 2 : Hasil Analisis Perhitungan Curah Hujan Rancangan Harian	28
Gambar 3: Pra-desain Constructed Wetland di lokasi pengembangan Grand Kawanua.....	30

DAFTAR LAMPIRAN

Lampiran 1: Artikel dipresentasikan pada Konferensi Internasional SICEST 2016	41
Lampiran 2: Publikasi Book Chapter yang diterbitkan oleh SPRINGER Internasional	50
Lampiran 3: Surat Tugas.....	64

BAB 1. PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Dampak urbanisasi terhadap siklus air alami sangatlah jelas. Dampak tersebut termasuk perubahan baik terhadap kualitas air hujan maupun kuantitasnya (Goonetilleke et al. 2005; Prakash 2005; Wong 2006). Bertambahnya bagian permukaan kedap air akibat urbanisasi telah menyebabkan lebih sering terjadi dan makin besarnya volume limpasan permukaan air hujan karena makin berkurangnya infiltrasi air hujan ke dalam tanah (Clar et al. 2004a; Wong et al. 2000). Hal lain yang merupakan dampak urbanisasi terhadap kuantitas air hujan yaitu makin pendeknya waktu konsentrasi (lag time) yang diakibatkan pada makin besarnya debit limpasan permukaan (runoff). Dampak hidrologi dan hidrolika air hujan di perkotaan telah disadari sebagai ancaman yang serius terhadap lingkungan. Akan tetapi, dampak urbanisasi terhadap kualitas air hujan adalah jauh lebih kritis. Hal ini disebabkan karena meningkatnya aktivitas kehidupan manusia yang menambah produksi berbagai jenis limbah (Herngren et al. 2006).

Pelestarian lingkungan belakangan ini telah menjadi topik yang menarik perhatian berbagai kalangan, mulai dari masyarakat biasa, para ahli ilmu pengetahuan dan pemerintah sebagai pemegang regulasi. Kerusakan lingkungan yang diakibatkan oleh polusi hasil buangan aktivitas manusia, termasuk polusi air hujan merupakan masalah yang perlu disikapi dengan serius, mengingat lingkungan yang telah rusak tidak dapat diperbaiki. Meningkatnya kesadaran masyarakat terhadap polusi air hujan dan dampaknya terhadap lingkungan tahun-tahun belakangan ini telah meningkatkan perhatian semua pihak akan strategi penanganan air hujan di perkotaan yang berfokus pada pembersihan bahan pencemar (pollutant) air hujan. Perhatian publik akan pentingnya penanganan polusi air hujan di perkotaan telah menyebabkan pemerintah selaku pemegang otoritas regulasi ditantang untuk menyediakan sistem manajemen yang bijaksana dan sesuai (Goonetilleke and Thomas 2003).

Penerapan sistem drainase yang berwawasan lingkungan dirasakan sebagai salah satu upaya untuk menjawab persoalan ini. Secara tradisional sistem drainase perkotaan bertujuan untuk membuang air limpasan permukaan secepat-cepatnya untuk meminimalkan resiko banjir. Akan tetapi, dengan meningkatnya kesadaran masyarakat atas persoalan-persoalan lingkungan belakangan ini, penanganan air hujan tidak hanya difokuskan pada penanganan kuantitasnya tetapi lebih terintegrasi pada manajemen kuantitas dan kualitas dengan

tambahan tujuan/sasaran yaitu keramahan (amenity), pemandangan dan estetika, konservasi air dan restorasi ekologi (Victorian Stormwater Committee 1999; Wong 2000; Brown 2005).

Water Sensitive Urban Design (WSUD) merupakan salah satu konsep penanganan air hujan yang berwawasan lingkungan yang dapat menggantikan sistem drainase konvensional dengan menggunakan metoda detensi, retensi dan infiltrasi. WSUD adalah salah satu konsep manajemen air hujan yang berwawasan lingkungan dengan pendekatan filosofi model dan perencanaan kota (urban design) yang bertujuan untuk meminimalkan dampak hidrologi pembangunan perkotaan (urban development) terhadap lingkungan sekitarnya (Lloyd et al. 2002). Konsep WSUD memandang air hujan sebagai aset, bukan sebagai ancaman, sehingga WSUD memanfaatkan jalan air/saluran alam yang ada tanpa merubah kondisinya. Konsep WSUD pertama kali digagaskan di Australia pada tahun 1990an. Konsep ini telah teruji dan digunakan pada setiap areal/kawasan pembangunan baru (new development area) di Australia. Penerapan konsep WSUD dalam manajemen air hujan dapat berupa upaya non-struktur dan komponen struktur. Komponen struktur WSUD adalah bangunan/unit penanganan air hujan yang mengurangi debit dan volume limpasan permukaan (runoff quantity treatment) dan secara bersamaan mengurangi polusinya (runoff quality treatment).

1.2 Rumusan Masalah

Manado sebagai Ibu Kota Provinsi Sulawesi Utara merupakan kota yang strategis dan memiliki perkembangan dan tingkat pertumbuhan penduduk dan ekonomi yang sangat pesat. Angka pertumbuhan penduduk yang cukup tinggi yaitu sekitar 1,26% per tahun dibarengi dengan laju pembangunan infrastruktur yang sangat pesat mengakibatkan perubahan kondisi lahan dan penurunan daya dukungnya. Melejitnya pembangunan dan pembukaan lahan baru baik untuk kawasan ekonomi/bisnis maupun kawasan pemukiman secara signifikan mengakibatkan penurunan kualitas lingkungan hidup (environmental degradation). Dalam kurun waktu kurang dari dua dasawarsa, lebih dari 50 ha kawasan bisnis baru telah dikembangkan melalui upaya reklamasi Pantai Manado. Demikian pula manjurnya pembangunan wilayah pemukiman baru dalam sepuluh tahun terakhir ini telah menjadikan nilai properti di Kota Manado meningkat 5 kali lipat. Di satu sisi, Pemerintah Kota Manado mencanangkan arah pembangunan Kota Manado menjadi kota yang berwawasan lingkungan. Hal ini tertuang dalam Visi Kota Manado yaitu “Manado Kota Model Ekowisata”.

Melejitnya pembangunan Kota Manado khususnya pengembangan kawasan bisnis/komersil dan pengembangan kawasan pemukiman baru menjadikan tantangan bagi pemerhati

lingkungan hidup, para ahli dan Pemerintah Kota Manado sebagai pemegang otoritas regulasi agar pembangunan ini terkendali dengan dampak lingkungan yang sekecil mungkin. Upaya penerapan pembangunan yang berwawasan lingkungan di berbagai sektor terutama pembangunan sarana dan prasarana fisik mutlak diperlukan demi terwujudnya kota yang berwawasan lingkungan sesuai dengan Visi Kota Manado. Sistem drainase yang merupakan salah satu fasilitas infrastruktur perkotaan juga perlu mendapat perhatian. Sistem drainase yang berwawasan lingkungan sebagai alternative dari sistem drainase konvensional dan komponen dari model pembangunan perkotaan (urban development) yang modern dan berwawasan lingkungan perlu diterapkan untuk mewujudkan Kota Manado sesuai dengan visinya. Meskipun konsep WSUD telah berhasil dikembangkan di kota-kota di Australia yang beriklim sub-tropis, namun karena kota-kota di Indonesia memiliki perbedaan karakteristik terutama perbedaan tinggi curah hujan serta sifat-sifat curah hujan dan perbedaan iklim, akan menjadi pertanyaan dan tantangan bagaimana konsep WSUD tersebut dapat diterapkan di Indonesia.

BAB 2. TINJAUAN PUSTAKA

Sistem drainase air hujan tradisional dibangun terutama dengan tujuan untuk mitigasi banjir dan sedikit sekali perhatian yang diberikan terhadap mitigasi dampak lingkungan. Dengan alasan tersebut, sistem drainase perkotaan umumnya telah dibangun dengan fokus pada kapasitas angkut untuk meminimalkan resiko terhadap banjir. Namun demikian, meningkatnya kesadaran masyarakat terhadap kualitas lingkungan hidup belakangan ini menyebabkan penanganan drainase air hujan lebih terintegrasi pada manajemen kuantitas dan kualitas dengan sejumlah tujuan/sasaran tambahan yaitu keramahan (amenity), pemandangan dan estetika, konservasi air dan restorasi ekologi (Victorian Stormwater Committee 1999; Wong 2000; Brown 2005). Water Sensitive Urban Design (WSUD) adalah salah satu metoda penanganan air hujan yang terintegrasi dan berkelanjutan, diciptakan sebagai alternatif dari sistem drainase perkotaan konvensional. WSUD memiliki pendekatan filosofi untuk model dan perencanaan perkotaan yang bertujuan untuk meminimalkan dampak hidrologi dari pembangunan perkotaan terhadap lingkungan sekitar (Lloyd et al. 2002). Konsep WSUD telah diusulkan dan dikembangkan pertama kali di Australia untuk model, perencanaan dan pembangunan perkotaan terintegrasi dan berkelanjutan (Gardiner and Hardy 2005).

Penerapan konsep WSUD dalam manajemen air hujan dapat berupa upaya non-struktur dan komponen struktur atau kombinasi keduanya. Komponen struktur WSUD adalah bangunan/unit penanganan air hujan yang mencegah, membawa dan mengumpulkan bahan pencemar (polutan), mendukung proses penjernihan polutan melalui proses fisik, kimia dan biologi, serta menahan limpasan air hujan untuk meningkatkan kualitas air. Mouritz (2006) membagi komponen struktur WSUD menjadi 3 (tiga) level yang berbeda; primer, sekunder dan tersier. Level primer menargetkan sampah, limbah padat berukuran besar dan sedimen kasar. Struktur WSUD pada level ini adalah *gross pollutant trap*, *trash rack*, *sedimen trap* dan *oil collector*. Struktur WSUD level sekunder yang bertujuan untuk menghilangkan sedimen, partikel-partikel logam berat dan bakteri antara lain *vegetated buffer strips*, *grass swales*, *detention basins*, *bioretention filters*, *infiltration trenches* and *infiltration basins*. Sedangkan struktur WSUD level tersier digunakan untuk menghilangkan sedimen halus, nutrients, bakteri dan logam-logam berat. Rawa buatan (constructed wetland) adalah komponen WSUD yang termasuk dalam kategori ini. Berikut ini adalah penjelasan beberapa komponen struktur WSUD yang paling umum dijumpai.

2.1 Gross Pollutant Traps

Gross Pollutant Traps (GPTs) adalah komponen struktur WSUD yang berperan untuk mengurangi jumlah polutan berukuran besar (gross pollutant) yang mengalir pada saluran air. Menurut Allison, et. al. (1997), bahwa *gross pollutant* adalah debris yang berukuran lebih dari 5 mm. Karena jelas kelihatan, keberadaan *gross pollutant* pada umumnya dijadikan indikator pencemaran air. GPTs adalah komponen yang sangat penting karena melindungi komponen-komponen struktur WSUD yang ada di hilir dari penyumbatan dan kerusakan. Sejumlah tipe GPTs yang berbeda digunakan untuk penjernihan air hujan. Setiap GPT memiliki spesifikasi desain yang berbeda dengan unjuk kerja yang spesifik dalam menangkap *gross pollutant*. GPTs yang umumnya dipakai sebagai komponen struktur WSUD adalah:

- 1) Grated entrance screens, gril besi di atas saluran drainase atau manhole.
- 2) Side entry pit traps (SEPTs), gril besi yang dipasang di tepi jalan, di samping kerb sebelum runoff air hujan memasuki saluran drainase di tepi jalan
- 3) Baffled pits, bak beton dibawah tanah yang memiliki sekat-sekat untuk menangkap sampah yang mengapung dan sampah yang mengendap
- 4) Litter control devices (LCDs), bak beton di bawah tanah yang berfungsi untuk memisahkan runoff air hujan di atas dan sampah pada bilik di bagaian bawah.
- 5) Release net, jaring penyaring sampah yang ditempatkan setelah pipa drainase
- 6) Trash rack, penyaring sampah dari gril besi yang ditempatkan setelah pipa drainase
- 7) Boom diversion system, bak beton di bawah tanah yang dapat membelokkan sampah pada bilik pengumpul sampah.
- 8) Return flow litter baskets, gril besi yang menyaring sampah dari aliran air balik pada gorong-gorong.
- 9) Continuous devlective separation (CDS), alat yang pemisah *gross pollutant*, akibat gerakan air berputar. Alat ini memiliki sistem *self cleaning*.
- 10) Floating debris trap (FDT), alat untuk menangkap debris/sampah yang mengapung yang dipasang setelah outlet saluran drainase pada sungai, danau atau laut.
- 11) Flexible floating boom, juga menangkap debris mengapung, dipasang melintang saluran drainase yang berukuran besar atau melintang sungai.
- 12) Sedimen settling basin, kolam buatan yang dapat mengendapkan sedimen
- 13) Circular settling tank Humeceptor, tangki berbentuk bulat yang dapat menangkap debris dan dikumpulkan di bagian bawah tangki

14) Hydrodynamic separator Storm King, alat penangkap debris modern yang bekerja dengan membuat air bergerak memutar dalam alat tersebut.

2.2 Vegetated Swales, Filter Strips dan Bioretention Swales

2.2.1 Vegetated Swales

Vegetated swale adalah saluran dangkal dan lebar berpenampang parabola atau trapezium dimana pada bagian dasar dan sisi ditutupi tumbuh-tumbuhan (rumput). Tipikal vegetated swale digunakan pada median jalan, atau di tepi jalan dimana air mengalir lambat, sebagai pengganti kerb dan selokan (Fiener and Auerswald 2005). Swale umumnya didesain dengan kemiringan sisi tidak lebih curam dari 3:1, dan kemiringan memanjang antara 1% dan 4% dimana pada kemiringan ini vegetated swales dapat beroperasi baik untuk mengalirkan dan treatment air hujan.

2.2.2 Filter Strips

Filter strips (atau buffer strips) adalah area berumput terbuka dimana runoff mengalir di atasnya menuju ke titik pembuangan. Runoff yang mengalir melintasi filter strips didistribusikan sebagai aliran dangkal menyebar dan rata. Filter strip secara khas disediakan sebagai *pre-treatment* sebelum runoff memasuki komponen struktur WSUD lainnya seperti vegetated swale. Filter strip tidak hanya mengurangi muatan sedimen tapi juga mengurangi volume dan debit puncak runoff dengan adanya infiltrasi dan penurunan kecepatan aliran (DCR 1999). Proses penjernihan air (water treatment) terjadi pada vegetated swales dan filter strips melalui proses fisik dan biokimia. Proses pembersihan polutan melalui proses fisik dicapai dengan cara pengendapan, filtrasi dan infiltrasi dari partikel-partikel padat tersuspensi dan juga otomatis polutan yang menempel pada partikel-partikel tersebut (Department of Water and Swan River Trust 2007). Sedangkan proses biokimia terjadi sehubungan dengan polutan tertentu seperti hidrokarbon yang oleh vegetasi dan mikroorganisme yang ada pada tanah.

2.2.3 Bioretention Swales

Bioretention swales adalah vegetated swales yang pada bagian bawahnya dibuat galian parit yang diisi media bepori (biasanya lempung pasir). Proses pembersihan air pada bioretention swales terjadi oleh kombinasi komponen swale dan sistem bioretensi. Komponen swale mengeluarkan sedimen sedang dan kasar, sementara sistem bioretensi

menghilangkan partikel-partikel yang lebih halus termasuk polutan-polutan yang menempel melalui filtrasi, infiltrasi dan proses biologis.

2.3 Detention, Retention Ponds/Basins

Detention/retention ponds/basins (selanjutnya pada sub bab ini disebut “*retention basin*”) adalah fasilitas penanganan air hujan yang menyediakan tampungan terhadap runoff untuk ditahan selama hujan berlangsung dan kemudian secara perlahan-lahan dilepas melalui pipa outlet. Proses infiltrasi air hujan diijinkan terjadi pada *retention basin* selama periode penahanan. Karena itu, *retention basin* memberikan perlindungan di hilir dan kontrol banjir dengan mengurangi volume runoff dan menurunkan debit puncak. Mekanisme pembersihan polutan pada retention basin adalah dengan pengendapan partikel dan zat padat terlarut termasuk polutan yang melekat pada partikel seperti fosfor, logam berat dan hidrokarbon (Department of Water and Swan River Trust 2007). Lebih jauh, retention basin dapat juga memberikan estetika dan keuntungan sebagai tempat rekreasi disamping suplai air untuk irigasi dan pemadam kebakaran (Clar et al. 2004b).

2.4 Infiltration Systems

Infiltration systems menangkap runoff dan menginfiltrasikannya ke dalam tanah disekitar dimana sistim ini dipasang. Fokus utama dari infiltration system adalah pada segi kuantitas air hujan untuk mengurangi volume dan debit puncak runoff. Namun, sistem ini juga memberikan kontribusi terhadap peningkatan kualitas air hujan melalui filtrasi air hujan ke dalam tanah. Berikut ini adalah beberapa bentuk infiltration systems yang sering dipakai:

- 1) **Soakwell (Sumur Resapan)**, adalah sumur kering terbuat dari beton atau PVC berbentuk silinder yang diletakkan secara vertical diatas dasar berbentuk bulat. Lubang-lubang yang ada pada dinding sumur dan lubang drainase pada dasar yang dibungkus oleh bahan geotekstil menyebabkan runoff air hujan yang dimasukkan ke dalam soakwell terinfiltrasi ke dalam tanah di seputar soakwell (Browne et al. 2008).
- 2) **Infiltration Trenches**, adalah parit dangkal berkedalaman 0,5 sampai 1,5 meter yang diisi kerikil atau agregat kasar lain, kemana runoff dialirkan. Infiltration trench dibungkus dengan bahan geotekstil untuk mencegah partikel tanah masuk ke dalam material isian.
- 3) **Porous Pavement dan Modular Pavement**. *Porous pavement* adalah lapisan penutup berpori, dibentangkan di atas lapisan agregat yang laju penyerapannya tinggi atau lapisan kerikil dibatasi bahan geotekstil. Ada dua kelompok *porous pavement*; pavement terbuka dari aspal atau beton dengan porositas yang tinggi dan *modular pavement* dengan celah

yang cukup besar di antara modul yang kedap air. Porous pavement memungkinkan runoff terinfiltrasi melalui pori-pori atau melalui celah modul-modul ke dalam lapisan agregat di bawahnya, sebelum akhirnya runoff tersebut secara berangsur-angsur meresap ke dalam tanah di bawahnya. Porous pavement dapat menghilangkan sedimen, *nutrient*, logam berat dan hidrokarbon dari air hujan melalui proses adsorpsi, filtrasi dan dekomposisi biologi.

2.5 Bioretention Basins

Bioretention basin adalah komponen struktur WSUD yang memenej dan merawat runoff air hujan dengan melewatkan runoff melalui media filter yang telah disediakan dan ditanami tumbuh-tumbuhan. *Bioretention basin* menggabungkan baik tumbuh-tumbuhan maupun media filter untuk menghilangkan polutan. Vegetasi yang menutup permukaan sistem meningkatkan proses filtrasi sambil menjaga porositas tanah, sementara media filter menghilangkan sedimen dan partikel padat terlarut ketika air hujan melewatinya. Bioretention basin mengurangi volume runoff melalui pengisian defisit kandungan air pada media filter dan menurunkan debit puncak dengan retensi. Transpirasi dari tumbuh-tumbuhan adalah penyebab utama terjadinya resesi kandungan air tanah pada media filter. Para peneliti mencatat adanya penurunan signifikan pada volume air hujan yang keluar dari bioretention (Hunt 2003; Hunt et al. 2006; Davis et al. 2006; Dietz and Clausen 2005).

2.6 Constructed Wetlands

Constructed wetlands (rawa buatan) adalah badan air buatan yang dangkal dan padat dengan vegetasi. Constructed wetland pada dasarnya diciptakan untuk menghilangkan polutan, untuk meningkatkan keindahan pemandangan dan untuk memastikan ketersediaan air untuk digunakan kembali sebagai keuntungan tambahan. Sebuah constructed wetland umumnya terdiri dari zona inlet, zona vegetasi sebagai areal utama dari wetland, dan saluran bypass. Zona inlet berupa kolam sedimentasi yang relatif dalam, terletak di bagian hulu dan umumnya digunakan untuk *pre-treatment* untuk sedimen kasar dan *gross pollutants*. Zona vegetasi sebagai bagian utama dari sistem wetland memiliki tubuh air yang dangkal yang padat dengan vegetasi. Constructed wetland mengurangi volume dan debit puncak runoff melalui infiltrasi, evaporasi dan retensi. Constructed wetland adalah komponen treatment air hujan yang efisien, khususnya untuk runoff yang mengandung polutan terlarut berkonsentrasi tinggi yang sulit dihilangkan oleh komponen treatment air hujan yang lain.

BAB 3. TUJUAN DAN MANFAAT PENELITIAN

3.1 Tujuan Penelitian

Penelitian ini bertujuan untuk membantu *stakeholders* yaitu para pengembang dan pemerintah Kota Manado dalam membangun infrastruktur perkotaan dengan model pembangunan perkotaan yang modern dan berwawasan lingkungan. Bantuan yang dimaksud adalah perencanaan sistem drainase yang berwawasan lingkungan dengan menggunakan konsep WSUD, yang dapat diaplikasikan pada areal/kawasan pembangunan baru, baik areal/kawasan bisnis/komersil maupun areal/kawasan pemukiman.

3.2 Manfaat/Urgensi Penelitian

Pembangunan memerlukan ruang yang berakibat pada berubahnya fungsi lahan. Jika pembangunan tidak disertai perencanaan dan kajian-kajian yang matang, maka konsekuensinya terjadi penurunan kualitas lingkungan hidup. Pembangunan yang membabi buta yang tidak memperhatikan aspek berkelanjutan dan tidak memperhatikan dampak lingkungan dapat menyebabkan kerusakan lingkungan yang tidak hanya mahal harganya, tetapi juga tidak bisa dikembalikan (*irreversible*), karena itu hal ini tidak bisa terus dibiarkan terjadi. Dukungan para ahli untuk membantu pemerintah dan masyarakat dalam menyiapkan rencana pembangunan infrastruktur perkotaan yang berwawasan lingkungan dan berkelanjutan dapat membuahkan hasil pembangunan dengan resiko kerusakan lingkungan sekecil mungkin. Karena itu penelitian ini difokuskan untuk menghasilkan karya desain infrastruktur yang mempertahankan kualitas lingkungan hidup. Hasil penelitian ini akan menjadi model pembangunan yang ramah lingkungan dan berkelanjutan khususnya pembangunan infrastruktur drainase.

3.3 Hasil yang Ditargetkan dan Kontribusi Terhadap Ilmu Pengetahuan

Hasil nyata berupa produk desain yang langsung dapat dimanfaatkan oleh para stakeholders, dalam hal ini adalah Pemerintah Kota Manado dan para pengembang real estate, yang dibagi dalam dua tahun yaitu luaran berupa Pra-desain Sistem Drainase Berwawasan Lingkungan berdasarkan konsep WSUD pada tahun pertama, dan Detail Desain Lengkap Sistem Drainase Berwawasan Lingkungan berdasarkan konsep WSUD pada tahun kedua.

Penelitian ini merupakan studi kasus yang diterapkan di Kota Manado. Disamping luaran berupa produk desain teknologi yang bermanfaat langsung bagi masyarakat, penelitian ini

juga dapat menjadi model untuk diterapkan di berbagai kota di Indonesia yang secara spesifik beriklim tropis, bahkan juga untuk kota-kota di dunia yang memiliki karakteristik yang sama dengan Kota Manado. Luaran yang akan dihasilkan, tidak hanya berupa produk desain, tetapi juga aspek ilmiah bagaimana konsep yang berhasil diterapkan di wilayah beriklim sub-tropis migrasi ke wilayah beriklim tropis. Kajian aspek ilmiah ini diharapkan dapat memerikan *outcome* yang memiliki kontribusi terhadap pengembangan ilmu pengetahuan.

BAB 4. METODE PENELITIAN

4.1 Lokasi Penelitian

Lokasi penelitian adalah areal/kawasan pembangunan baru (new development area) yang terletak di Kota Manado, Provinsi Sulawesi Utara. Areal/kawasan pembangunan dimaksud adalah adalah areal/kawasan bisnis/komersial dan areal/kawasan pemukiman. Jika jumlah kawasan pembangunan baru yang ada di Kota Manado terbatas maka lokasi penelitian dapat diperluas pada kawasan pembangunan baru di seputaran Kota Manado. Pemilihan lokasi secara spesifik akan ditentukan setelah survey lapangan awal selesai. Lokasi yang dipilih adalah areal/kawasan dimana ada pembangunan baru oleh pengembang.

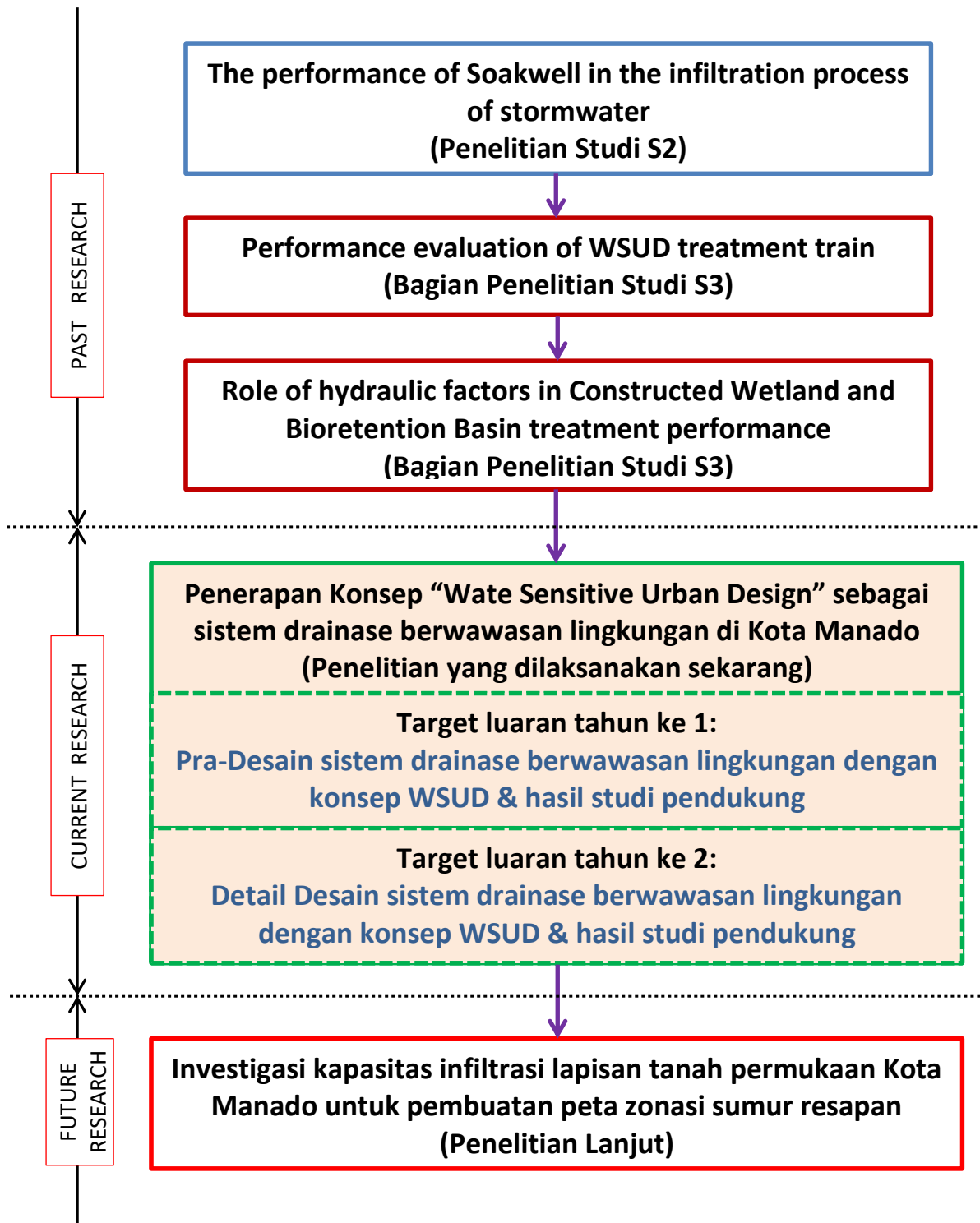
4.2 Peta Jalan (Road Map)

Penelitian ini berhubungan erat dengan penelitian yang sudah dilaksanakan selama masa studi S2 di Curtin University Australia dan penelitian selama masa study S3 di Queensland University of Technology. Penelitian ini bersifat terapan, mengaplikasikan konsep yang sudah diteliti selama masa studi S3 ke dalam bentuk perencanaan yang konkrit, untuk menghasilkan produk teknologi berupa desain infrastruktur Sistem Drainase Berwawasan Lingkungan di Kota Manado. Penelitian ini direncanakan akan berlangsung selama dua tahun, dengan demikian tahapan penelitian juga dibagi setiap tahun. Setiap tahap (setiap tahun), penelitian ini menghasilkan luaran yang konkrit, berupa desain produk teknologi dilengkapi dengan konsep-konsep pendukung.

Untuk menjaga kelanjutan penelitian pada topik ini terus berlangsung, maka road map penelitian telah dibuat untuk dijadikan pedoman pada masa datang. Setelah penelitian ini selesai dalam kurun waktu 2 (dua) tahun, maka penelitian pada topik ini akan dilanjutkan dengan fokus yang berbeda. Jika dalam penelitian ini tinjauan Sistem Drainase Berwawasan Lingkungan menggunakan Konsep Water Sensitive Urban Design (WSUD) secara global keseluruhan, maka pada masa datang setelah penelitian ini selesai, penelitian akan dilanjutkan dengan berkonsentrasi pada masing-masing komponen struktur WSUD.

Komponen struktur WSUD yang akan dipilih untuk menjadi fokus pada lanjutan penelitian adalah soakwell/sumur resapan. Komponen ini dipilih karena komponen ini pernah diteliti aspek hidrolisnya selama masa studi S2 di Curtin University, Australia. Alasan lain dipilihnya komponen ini untuk dijadikan studi lanjutan adalah karena komponen WSUD ini saat ini

telah menjadi populer di Indonesia. Banyak soakwell/sumur resapan yang telah dibuat, bahkan di beberapa kota di Indonesia, sumur resapan ini telah diadakan dalam jumlah yang besar. Untuk jelasnya, peta jalan (road map) penelitian ini serta hubungannya dengan penelitian-penelitian yang telah ada serta rencana penelitian yang akan dilanjutkan diberikan pada diagram berikut ini:



Gambar 1: Peta Jalan (Road Map) Penelitian

4.3 Tahapan Penelitian

Penelitian ini yang diusulkan dalam durasi selama 2 (dua) tahun dilaksanakan menurut tahap-tahap penelitian yang disusun secara berurutan sebagai berikut:

A. Tahap pelaksanaan penelitian tahun ke 1:

- 1) Pemantapan desain dan kerangka pelaksanaan penelitian. Output dari tahapan ini adalah diperolehnya rencana kerja yang jelas disesuaikan dengan waktu pelaksanaan.
- 2) Survey institusional, untuk mengetahui kawasan-kawasan pembangunan baru berijin yang dapat dijadikan lokasi penelitian. Pada tahap ini akan dihasilkan daftar list kawasan-kawasan pembangunan baru dan data-data termasuk alamat para pengembangnya.
- 3) Survey institusional pada kantor-kantor para pengembang kawasan pembangunan baru, untuk mendapatkan informasi mengenai penataan lay-out, peta-peta dan rencana-rencana pengembangan kawasan mereka.
- 4) Survey lapangan awal, untuk mengetahui kondisi lapangan dari kawasan-kawasan pembangunan baru berijin serta prediksi kemungkinan penerapan sistem drainase berwawasan lingkungan. Survey ini menghasilkan hasil pengamatan visual berdasarkan lay-out, peta-peta/gambar-gambar dan rencana-rencana pengembangan kawasan. Konfirmasi dimensi dan ukuran-ukuran juga akan diperoleh dalam survey lapangan awal ini.
- 5) Penetapan kawasan-kawasan pembangunan baru yang akan dijadikan objek atau lokasi penelitian, yang dituangkan dalam daftar objek penelitian.
- 6) Survey institusional, untuk mendapatkan data sekunder berupa:
 - Kondisi daerah tangkapan hujan (catchment area) untuk tiap-tiap lokasi kawasan pembangunan baru, terutama kondisi lapisan tanah permukaan.
 - Peta topografi dari tiap kawasan pembangunan baru yang dipilih
 - Data curah hujan, diharapkan bisa diperoleh data curah hujan per menit oleh alat pengukur hujan otomatis dari stasiun-stasiun pengamatan hujan yang ada.
- 7) Penetapan sementara komponen-komponen struktur WSUD yang dapat diaplikasikan pada setiap lokasi/kawasan pembangunan baru.
- 8) Kajian dan analisa kesesuaian setiap komponen struktur WSUD yang ditetapkan dengan unsur-unsur lain dari model pembangunan perkotaan (urban development) yang berwawasan lingkungan dan berkesinambungan.

- 9) Analisa hidrologi, untuk mendapatkan debit banjir rencana dari tiap catchment struktur WSUD yang direncanakan.
- 10) Analisa perkiraan laju kecepatan infiltrasi pada titik-titik dimana komponen struktur WSUD akan diletakkan berdasarkan kondisi lapisan tanah permukaan.
- 11) Analisa hidrolika dari setiap komponen struktur WSUD yang direncanakan untuk menghasilkan parameter-parameter hidrolika yang diperlukan dalam analisa selanjutnya.
- 12) Penetapan dimensi setiap komponen struktur WSUD yang direncanakan. Dimensi dari komponen-komponen struktur WSUD yang dihasilkan ini merupakan luaran Pra-desain sistem drainase berwawasan lingkungan yang diusulkan.
- 13) Perhitungan estimasi biaya dari setiap komponen struktur WSUD yang diusulkan.

B. Tahap pelaksanaan penelitian tahun ke 2:

- 1) Survey dan konsultasi dengan para pengembang untuk secara bersama-sama memutuskan komponen struktur WSUD mana yang akan dibuatkan detail desainnya.
- 2) Survey pengukuran topografi dan pemetaan secara detail untuk memperoleh tata letak komponen struktur yang akan didetail desainkan.
- 3) Evaluasi dan hitung ulang analisa hidrologi disesuaikan dengan data hidrologi dan klimatologi terbaru untuk menetapkan debit rencana dari tiap catchment struktur WSUD yang direncanakan.
- 4) Analisa hidrolika untuk mendapatkan dimensi dari desain komponen struktur WSUD *Swale System*.
- 5) Pembelian software untuk menghitung dimensi komponen struktur WSUD *Infiltration System*.
- 6) Penetapan lokasi dan jumlah tes pit, dilanjutkan dengan pelaksanaan pembuatan test pit berukuran 1 meter x 2 meter dengan kedalaman 1,5 meter, untuk melakukan pengujian kapasitas laju infiltrasi.
- 7) Pelaksanaan pengujian laju infiltrasi pada test pit yang telah dibuat dengan menggunakan water truck.
- 8) Analisa hidrolika, untuk mendapatkan dimensi komponen struktur WSUD *Swale System* berdasarkan debit rencana yang dihitung dalam analisa hidrologi.
- 9) Running software untuk menghitung dimensi komponen struktur WSUD *Infiltration System*, berdasarkan data hasil pengujian laju infiltrasi pada test pit-test pit.

- 10) Simulasi dan modelling untuk mendapatkan dimensi komponen struktur WSUD *Retention Basin, Bioretention Basin dan Constructed Wetland*
- 11) Finalisasi desain komponen-komponen struktur WSUD yang sudah didimensi untuk dibuatkan Detail Desainnya.
- 12) Pembuatan Detail Desain Lengkap Sistem Drainase Berwawasan Lingkungan berdasarkan konsep WSUD.
- 13) Penggambaran Sistem Drainase Berwawasan Lingkungan yang didetail desainkan
- 14) Pembuatan spesifikasi teknik dari struktur WSUD yang direncanakan
- 15) Pembuatan metodologi pelaksanaan pekerjaan
- 16) Pembuatan rencana anggaran biaya
- 17) Pembuatan manual operasi dan pemeliharaan
- 18) Membuat kajian lingkungan terhadap rencana pembangunan sistem drainase berwawasan lingkungan yang dihasilkan, dimulai dari perioda pra konstruksi, pelaksanaan konstruksi dan perioda pasca konstruksi
- 19) Melakukan kajian komponen-komponen paralel lain dalam model pembangunan perkotaan yang berwawasan lingkungan dan berkesinambungan (sustainable urban development)

4.4 Luaran

Output/luaran yang dihasilkan dalam penelitian ini yang dibagi menjadi dua tahap pelaksanaan adalah sebagai berikut:

Luaran pada akhir tahun pertama:

- (1) Pra-desain Sistem Drainase Berwawasan Lingkungan berdasarkan konsep WSUD, yang dituangkan dalam:
 - Gambar-gambar pra-desain
 - Estimasi biaya setiap komponen struktur WSUD yang diusulkan
- (2) Hasil analisa hidrologi
- (3) Hasil analisa hidrolika
- (4) Hasil kajian terhadap kesesuaian dengan model pembangunan perkotaan (urban development) yang berwawasan lingkungan dan berkesinambungan.
- (5) Makalah yang dipresentasikan pada salah satu konferensi nasional atau internasional.
- (6) Artikel yang dipublikasikan pada salah satu jurnal nasional/ internasional atau sebagai book chapter yang dipublikasikan secara nasional/ internasional.

Luaran pada akhir tahun kedua:

- (1) Detail Desain Lengkap Sistem Drainase Berwawasan Lingkungan berdasarkan konsep WSUD, yang terdiri dari
 - Gambar-gambar desain lengkap
 - Spesifikasi teknis dari setiap komponen yang direncanakan
 - Metodologi pelaksanaan pekerjaan
 - Rencana anggaran biaya
 - Manual operasi dan pemeliharaan
- (2) Hasil evaluasi dan justifikasi hasil analisa hidrologi dan hidrolika
- (3) Hasil kajian lingkungan terhadap rencana pembangunan sistem drainase berwawasan lingkungan yang dihasilkan, dimulai dari perioda pra konstruksi, pelaksanaan konstruksi dan perioda pasca konstruksi
- (4) Rekomendasi komponen-komponen paralel lain dalam model pembangunan perkotaan yang berwawasan lingkungan dan berkesinambungan (sustainable urban development)
- (5) Makalah yang dipresentasikan pada salah satu konferensi nasional atau internasional
- (6) Artikel yang dipublikasikan pada salah satu jurnal nasional/ internasional.

BAB 5. HASIL DAN LUARAN YANG DICAPAI

5.1 Pemilihan Obyek Penelitian

Obyek penelitian sebagaimana disebutkan dalam tujuan penelitian adalah areal/kawasan pembangunan baru, baik areal/kawasan bisnis/komersil maupun areal/kawasan pemukiman. Dalam hal ini telah dilakukan survey terhadap beberapa kawasan pembangunan (development area) dan telah dilakukan evaluasi terhadap kesediaan fasilitas pembangunan sehingga dapat ditentukan apakah lokasi pembangunan tersebut dapat dijadikan obyek penelitian atau tidak. Penentuan tersebut secara garis besar didasarkan pada:

- Kesesuaian lahan yang tersedia untuk diaplikasikannya komponen-komponen WSUD
- Ketersediaan lahan untuk pembangunan komponen-komponen WSUD
- Kondisi topografi dan geologi
- Gambaran visual kemungkinan kondisi dan situasi lokasi setelah dibuatkannya komponen-komponen WSUD
- Perkiraan dampak lingkungan yang mungkin terjadi setelah dilakukan pemaubangan komponen-komponen WSUD ini, baik dampak negatif maupun dampak positif.
- Ketersediaan kerja sama dari developer
- Ketersediaan data-data pendukung dari pengembang, seperti gambar-gambar lay out plan dan sebagainya
- Ketersediaan data-data pendukung dari instansi-instansi terkait

Penentuan obyek berdasarkan pedoman dan acuan menurut kriteria-kriteria di atas merupakan hal mendasar yang perlu dipertimbangkan. Namun demikian faktor-faktor lain juga dapat mempengaruhi penetapan ini seperti misalnya kemudahan akses ke lokasi obyek yang direncanakan.

Sejauh ini telah dilakukan survey dan investigasi terhadap lokasi-lokasi pembangunan, baik untuk kawasan pemukiman maupun untuk kawasan bisnis, dan berdasarkan hasil kajian awal, telah ditetapkan kawasan-kawasan pembangunan yang akan dievaluasi untuk selanjutnya akan diuji berdasarkan parameter-parameter yang disebutkan pada halaman sebelum ini untuk ditetapkan sebagai obyek penelitian. Lokasi-lokasi pengembangan yang akan dievaluasi tersebut adalah sebagai berikut:

1. Citra Land
2. Paramount Hill
3. Grand Meridian
4. Malendeng Residence
5. Grand Kawanua
6. Green Hill Residence
7. Taman Sari Metropolitan
8. Holland Village
9. Griya Paniki Indah

Dari masing-masing lokasi pembangunan tersebut telah ditetapkan beberapa komponen Water Sensitive Urban Design (WSUD) untuk diaplikasikan. Komponen-komponen WSUD tersebut ditetapkan berdasarkan kriteria-kriteria yang sudah diuraikan pada bagian sebelum ini. Suatu hal atau kondisi saat ini yang sangat menggembirakan bahwa semua lokasi pembanguna tersebut di atas telah mengaplikasikan satu komponen WSUD yaitu Modular Pavement, yang merupakan salah satu bentuk dari infiltration system dalam konsep WSUD untuk jalan masuk (akses) dan seluruh jalan lingkungan di dalam lokasi pembangunan tersebut. Modular Pavement, atau yang lebih dikenal disini sebagai Paving Block atau Paving Stone merupakan sistem infiltrasi dalam WSUD yang secara signifikan dapat mengurangi volume aliran permukaan (runoff). Sebagaimana diketahui bahwa jalan, drive way, parking area dan prasarana transportasi didalam suatu kawasan pembangunan memanfaatkan lahan dapat mencapai 70% dari total luas lahan yang tersedia. Dengan dibuatkannya sistem infiltrasi Modular Pavement pada prasarana transportasi ini, tidak hanya mengurangi volume air hujan yang menjadi aliran permukaan (runoff) secara signifikan – yang berarti

mengurangi resiko banjir yang disebabkan oleh runoff lokal serta membantu proses pengisian air tanah – tetapi juga mendukung proses pemurnian air hujan (stormwater treatment) melalui proses infiltrasi air hujan ini.

5.1.1 Penetapan Obyek dan Variabel Evaluasi

Sebagaimana diuraikan di atas bahwa penetapan lokasi pengembangan untuk ditetapkan sebagai obyek penelitian adalah berdasarkan kriteria-kriteria yang diuraikan pada Sub Bab 5.1. Karena terdapat beberapa kriteria atau beberapa variabel yang diukur, maka analisis ini dilakukan dengan analisis statistik multivariable, dengan memberi nilai pada setiap kriteria/variabel tersebut. Karena penetapan dilakukan dengan cara membuat ranking skala prioritas, dimana prioritas terbaik diberikan pada lokasi pengembangan yang memiliki nilai tertinggi, diikuti oleh nilai kedua tertinggi, dan seterusnya. Teknik analisa ini selanjutnya lebih dikenal dengan Multi Criteria Decision Making (MCDM). Untuk keperluan analisa ini, 9 lokasi pengembangan di atas ditetapkan sebagai variable terikat, yaitu yang akan diuji tingkat prioritas atau nilai rankingnya.

Kesembilan lokasi pengembangan selanjutnya dibuatkan ID variabel terikatnya atau disebut Obyek ID, yang dapat disajikan sebagai berikut:

- | | |
|----------------------------|----------------------|
| 1. Citra Land, | Obyek ID: CL |
| 2. Paramount Hill | Obyek ID: PH |
| 3. Grand Meridian | Obyek ID: GM |
| 4. Malendeng Residence | Obyek ID: MR |
| 5. Grand Kawanua | Obyek ID: GK |
| 6. Green Hill Residence | Obyek ID: GHR |
| 7. Taman Sari Metropolitan | Obyek ID: TSM |
| 8. Holland Village | Obyek ID: HV |
| 9. Griya Paniki Indah | Obyek ID: GPI |

Asumsi yang digunakan bahwa setiap kriteria memiliki kepentingan yang sama yang berarti diberi bobot skala yang ekuivalen mulai dari 1 sampai 5, dimana bobot 1 sampai 5 memiliki arti sebagai berikut:

Bobot 1: Sangat tidak sesuai, sangat tidak tersedia, dan sangat berdampak

Bobot 2: Tidak sesuai, tidak tersedia, berdampak

Bobot 3: Kurang sesuai, kurang tersedia, kurang berdampak

Bobot 4: Sesuai, tersedia, tidak berdampak

Bobot 5: Sangat sesuai, sangat tersedia, sangat tidak berdampak

5.1.2 Matriks Evaluasi

Evaluasi dengan menggunakan teknik Multi Criteria Decision Making, agar lebih sederhana dituangkan dalam bentuk matriks sebagai berikut.

Tabel 1: Matriks Analisa MCDM

Kriteria	Obyek ID								
	CL	PH	GM	MR	GK	GHR	TSM	HV	GPI
- Kesesuaian lahan yang tersedia untuk diaplikasikannya komponen-komponen WSUD	5	4	5	4	5	3	5	4	3
- Ketersediaan lahan untuk pembangunan komponen-komponen WSUD	5	4	4	3	4	3	4	4	4
- Kondisi topografi dan geologi	4	4	4	4	5	3	5	4	5
- Gambaran visual kemungkinan kondisi dan situasi lokasi setelah dibuatkannya komponen-komponen WSUD	5	5	5	3	5	3	4	4	4
- Perkiraan dampak lingkungan yang mungkin terjadi setelah dilakukan pembaungan komponen-komponen WSUD ini, yaitu dampak negatifnya	4	4	5	3	4	4	4	3	3
- Kesiediaan kerja sama dari developer	4	3	4	4	5	3	4	2	5
- Ketersediaan data-data pendukung dari pengembang, seperti gambar-gambar lay out plan dan sebagainya	4	3	4	3	5	4	4	2	4
- Ketersediaan data-data pendukung dari instansi-instansi terkait	5	3	4	3	4	3	4	3	4
Total Skor	36	30	35	27	37	26	34	26	32

Analisa dengan menggunakan Multi Criteria Decision Making (MCDM) memberikan hasil ranking dari masing-masing pengembang, dimana skala prioritas kemudian nanti diurutkan berdasarkan jumlah skor yang terbanyak. Itu berarti jumlah skor yang lebih besar menggambarkan kondisi yang lebih sesuai untuk penerapan konsep WSUD ini karena nilai skor yang lebih besar menunjukkan kondisi yang lebih baik dan lebih sesuai.

Dari hasil analisa dengan menggunakan teknik MCDM ini, maka urutan skala prioritas berdasarkan ranking terbaik diberikan dalam susunan pada tabel berikut ini.

Tabel 2: Penetapan Obyek Berdasarkan Urutan Ranking

Nama Pengembang	Ranking	Nilai	Bobot (%)
Grand Kawanua (GK)	1	37	92,5
Citra Land (CL)	2	36	90
Grand Meridian	3	35	87,5
Taman Sari Metropolitan (TSM)	4	34	85
Griya Paniki Indah (GPI)	5	32	80
Paramount Hill (PH)	6	30	75
Malendeng Residence (MR)	7	27	67,5
Green Hill Residence (GHR)	8	26	65
Holland Village (HV)	9	26	65

Hasil analisa pada Tabel 2 menunjukkan bahwa dari 8 (delapan) kriteria yang dievaluasi, Grand Kawanua (GK) memiliki bobot kesesuaian terbesar yaitu sebesar 92,5%, sedangkan terkecil yaitu sebesar 65% adalah milik dari Green Hill Residence (GHR) dan Holland Village (HV). Perlu digaris bawahi bahwa dalam analisa ini hanya dilakukan terhadap 9 (sembilan) lokasi pengembang, tetapi terdapat beberapa lokasi pengembangan di Kota Manado yang tidak dimasukkan, karena berdasarkan observasi lapangan, lokasi-lokasi tersebut secara kasat mata dapat diperkirakan akan memiliki bobot kesesuaian yang sangat kecil. Penelitian ini dibatasi untuk difokuskan hanya pada 5 (lima) lokasi pengembang menurut 5 ranking terbaik pada Tabel 2. Meskipun demikian, mengingat keterbatasan dana

dan waktu, follow up perencanaan desain dilakukan satu persatu pengembang, yang dimulai dari lokasi pengembang dengan ranking terbaik.

Setelah ditetapkan, perencanaan desain dimulai, dengan memilih komponen WSUD yang tepat untuk masing-masing lokasi pengembang. Untuk menunjang perencanaan desain ini, maka dibutuhkan berbagai macam analisa, termasuk analisa hidrologi, hidrolika dan pemodelan hidrolika. Semua ini dibutuhkan untuk menetapkan dimensi dari komponen-komponen WSUD yang akan diaplikasikan.

5.2 Analisa Hidrologi

Analisa Hidrologi adalah pekerjaan utama dalam penelitian ini. Analisa hidrologi dalam penelitian ini bertujuan untuk mendapatkan curah hujan rencana berupa curah hujan harian maksimum untuk kala ulang yang berbeda-beda, dilanjutkan dengan perhitungan dan pembuatan hidrograf runoff untuk dilanjutnya dengan pemodelan hidrolika dan penetapan bentuk dan dimensi constructed wetland (rawa buatan) yang sesuai dengan kondisi hujan di wilayah Manado. Secara umum pembahasan analisa hidrologi adalah melakukan analisa hidroklimatologi dengan teknis analisa secara kuantitatif yang mengacu pada berbagai metode yang relevan dengan Standar Nasional Indonesia yang berlaku. Dengan memperhatikan berbagai karakteristik geografis yang terkait, diharapkan dapat diperoleh informasi berupa besaran hidrologi yang diperlukan untuk pekerjaan penelitian ini. Analisa data ini dimaksudkan untuk mendukung pekerjaan Analisa Hidrologi dalam menentukan curah hujan rencana, hidrograf debit runoff pada rencana constructed wetland (rawa buatan). Lingkup pekerjaan analisa hidrologi meliputi analisa data outlier, analisa hujan rancangan, perhitungan hidrograf runoff dan pada debit banjir rancangan. Hasil akhir dari analisa hidrologi ini adalah besaran debit banjir rancangan dengan berbagai periode ulang. Dalam perencanaan bangunan di tepi sungai, analisis hidrologi merupakan faktor penting untuk menentukan banjir rencana. Banjir rencana dimaksudkan untuk menentukan besaran banjir yang digunakan sebagai acuan dalam perencanaan bangunan di tepi sungai. Banjir rencana ditetapkan melalui analisis hidrologi dari sungai atau Daerah Pengaliran Sungai (DPS) dimana bangunan tersebut akan dibangun, dengan periode ulang tertentu sesuai dengan kriteria desain yang digunakan.

Data yang di kumpulkan ini diperoleh dari Badan Meteorologi, Klimatologi dan Geofisika (BMKG) Manado untuk stasiun klimatologi Kayuwatu Manado selama 10 tahun terakhir pengamatan (tahun 2006 s/d 2015) diperlihatkan pada Tabel 1.

Tabel 3. Curah Hujan Harian Maksimum Stasiun Klimatologi Kayuwatu

No.	Tahun	X	Rangking X
		(mm)	(mm)
1	2006	38,30	38,30
2	2007	74,00	50,30
3	2008	108,00	57,00
4	2009	70,00	70,00
5	2010	50,30	74,00
6	2011	76,10	76,10
7	2012	57,00	80,60
8	2013	90,20	90,20
9	2014	80,60	108,00
10	2015	170,00	170,00
Jumlah		814,50	814,50

Sumber: Badan Meteorologi, Klimatologi dan Geofisika, Manado

5.2.1 Uji Data Hujan Outlier

Sebelum data curah hujan dianalisa untuk mendapatkan curah hujan rancangan, terlebih dahulu dilakukan uji data outlier, untuk mengetahui apakah ada data curah hujan yang ekstrim karena kelalaian dalam pencatatan atau terjadi kondisi ekstrim. Uji data outlier ini dilakukan untuk data outlier tinggi dan data outlier rendah dengan syarat-syarat pengujian berdasarkan koefisien skewness ($C_{S_{Log}}$):

- Uji outlier tinggi terlebih dahulu jika $C_{S_{Log}} > 0.4$
- Uji outlier rendah terlebih dahulu jika $C_{S_{Log}} < -0.4$
- Uji outlier tinggi dan rendah sekaligus jika $-0.4 \leq C_{S_{Log}} \leq 0.4$

Perhitungan data outlier selanjutnya dilakukan dengan menggunakan Tabel 2.

Dari Tabel 2 diketahui $X_i \min = 38.30$
 $X_i \max = 170.00$

$$S_{Log} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\text{Log } X_i - \overline{\text{Log } X})^2}{n - 1}}$$

$$S_{Log} = 0.1793$$

Tabel 4. Perhitungan Outlier Data Hujan Stasiun Kayuwatu

No.	Tahun	X_i (mm)	Log X_i	$(\log X_i - \overline{\log X})$	$(\log X_i - \overline{\log X})^2$	$(\log X_i - \overline{\log X})^3$
1	2006	38,30	1,5832	-0,2930	0,0858	-0,0251
2	2007	74,00	1,8692	-0,0069	0,0000	0,0000
3	2008	108,00	2,0334	0,1572	0,0247	0,0039
4	2009	70,00	1,8451	-0,0311	0,0010	0,0000
5	2010	50,30	1,7016	-0,1746	0,0305	-0,0053
6	2011	76,10	1,8814	0,0052	0,0000	0,0000
7	2012	57,00	1,7559	-0,1203	0,0145	-0,0017
8	2013	90,20	1,9552	0,0790	0,0062	0,0005
9	2014	80,60	1,9063	0,0302	0,0009	0,0000
10	2015	170,00	2,2304	0,3543	0,1255	0,0445
Jumlah		814,50	18,7618	0,0000	0,2892	0,0166
Mean ($\log X$)			1,8762			

$$CS_{Log} = \frac{n \sum_{i=1}^n (\log X_i - \overline{\log X})^3}{(n-1)(n-2)S_{Log}^3}$$

$$CS_{Log} = 0.4009$$

∴ Karena $CS_{Log} > 0.4$ maka uji outlier tinggi terlebih dahulu

Uji outlier tinggi:

$$\log X_h = \overline{\log X} + (S_{Log} \times K_n)$$

$$\text{Untuk } n=10 \rightarrow K_n = 2.036 \Rightarrow \log X_h = 1.8762 + (0.1793 \times 2.036) = 2.2412$$

$$X_h = 174.2464 \text{ mm}$$

∴ Karena $X_i \text{ max} < X_h$ ($170.00 < 174.2464$) maka tidak ada data outlier tinggi

Uji outlier rendah:

$$\log X_l = \overline{\log X} - (S_{Log} \times K_n)$$

$$\text{Untuk } n=10 \rightarrow K_n = 2.036 \Rightarrow \log X_l = 1.8762 - (0.1793 \times 2.036) = 1.5112$$

$$X_l = 32.45 \text{ mm}$$

∴ Karena $X_i \text{ min} > X_l$ ($38.30 > 32.45$) maka tidak ada data outlier rendah

5.2.2 Analisis Curah Hujan Rancangan

Tujuan dari analisis frekuensi curah hujan ini adalah untuk memperoleh curah hujan rancangan untuk beberapa perioda ulang menurut beberapa jenis distribusi. Dari berbagai sebaran distribusi yang ada, berdasarkan hasil berbagai studi terdahulu yang pernah dilakukan, maka jenis sebaran distribusi yang cocok untuk daerah Sulawesi Utara adalah:

- a. Distribusi Gumbel Tipe I
- b. Distribusi Log Normal 2 Parameter
- c. Distribusi Log Pearson Type III

Jenis distribusi yang nantinya dipakai harus ditentukan dengan melihat karakteristik distribusi hujan daerah setempat. Periode ulang yang akan dihitung pada masing-masing jenis distribusi adalah untuk periode ulang 2, 5, 10, 20, 25, 50, dan 100 tahun.

1. Distribusi Gumbel Tipe I

Persamaan empiris untuk distribusi Gumbel Tipe I sebagai berikut:

$$X_T = \bar{X} + (S \times K)$$

Keterangan:

X_T = Nilai yang diharapkan terjadi untuk kala ulang tertentu (mm)

\bar{X} = Nilai rata-rata hitung X (mm)

K = Faktor frekuensi yang dihitung dengan $K = \frac{Y_T - Y_n}{S_n}$

Y_T = Reduced mean atau nilai reduksi data dari variabel yang diharapkan terjadi pada periode T, dihitung dengan $Y_T = -L_n \left\{ -L_n \left[\frac{T(x)-1}{T(x)} \right] \right\}$

Y_n = Reduksi nilai rata-rata data, untuk n=10 maka $Y_n = 0.4952$

S_n = Reduksi standard deviasi; untuk n=10, $S_n = 0.9496$

S = Simpangan baku, dihitung dengan $S = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2}{n-1}}$

n = Jumlah data

Hasil perhitungan distribusi Gumbel tipe 1 diberikan pada Tabel 5 berikut ini.

Tabel 5. Perhitungan Curah Hujan Rancangan Dengan Menggunakan Distribusi Gumbel Tipe I

T	Y_T	Sd	Y_n	S_n	K	X (mm)
2	0.3665	36.9212	0.4952	0.9496	-0.1355	76.4465
5	1.4999	36.9212	0.4952	0.9496	1.0581	120.5151
10	2.2504	36.9212	0.4952	0.9496	1.8483	149.6923
20	2.9702	36.9212	0.4952	0.9496	2.6064	177.6797
25	3.1985	36.9212	0.4952	0.9496	2.8468	186.5577
50	3.9019	36.9212	0.4952	0.9496	3.5876	213.9066
100	4.6001	36.9212	0.4952	0.9496	4.3228	241.0536

Sumber: Hasil Perhitungan

2. Distribusi Log Normal 2 Parameter

Distribusi Log-normal dua parameter mempunyai persamaan transformasi sebagai berikut:

$$\text{Log } X_t = \overline{\text{Log } X} + (k \cdot S \text{Log } X)$$

Keterangan,

X_t = Besarnya curah hujan dengan periode t (mm)

$\overline{\text{Log } X}$ = Rata-rata nilai logaritma data X hasil pengamatan (mm)

S Log = Standar Deviasi nilai logaritma data X hasil pengamatan

$$= \sqrt{\frac{\sum_{t=1}^n (\text{Log } X_t - \overline{\text{Log } X})^2}{n - 1}}$$

K = faktor frekuensi, sebagai fungsi dari koefisien variansi (cv) dengan periode ulang t. Nilai k dapat diperoleh dari tabel yang merupakan fungsi peluang kumulatif dan periode ulang.

C_s = koefisien kemencengan = $3 CV + CV^3$

C_K = koefisien kurtosis
 $= C_v^8 + 6C_v^6 + 15C_v^4 + 16C_v^2 + 3$

C_v = koefisien variasi = $\frac{\sigma}{\mu}$

σ = deviasi standar populasi Ln X atau log X

μ = rata-rata hitung populasi Ln X atau log X

Tabel 6. Perhitungan Curah Hujan Rancangan Dengan Menggunakan Distribusi Log Normal Dua Parameter

T	P	k	Log X	X (mm)
2	0.5000	-0.0474	1.8677	73.7357
5	0.2000	0.8232	2.0237	105.6206
10	0.1000	1.3068	2.1104	128.9560
20	0.0500	1.7213	2.1847	153.0190
25	0.0400	1.8021	2.1992	158.2075
50	0.0200	2.2060	2.2716	186.9110
100	0.0100	2.5407	2.3316	214.6066

Sumber: Hasil Perhitungan

3. Distribusi Log Pearson Tipe III

Distribusi Log Pearson Tipe III merupakan hasil transformasi dari distribusi Pearson Tipe III dengan menggantikan data menjadi nilai logaritmik. Persamaan distribusi Log Pearson Tipe III dapat ditulis sebagai berikut:

$$\text{Log } X_t = \overline{\text{Log } X} + (G \times S)$$

Keterangan:

X_t = Besarnya curah hujan dengan periode t (mm)

$\overline{\text{Log } X}$ = Rata-rata nilai logaritma data X hasil pengamatan (mm)

S = Standar Deviasi nilai logaritma data X hasil pengamatan

$$= \sqrt{\frac{\sum_{t=1}^n (\text{Log } X_t - \overline{\text{Log } X})^2}{n - 1}}$$

Cs = koefisien kepeccengan

$$= \frac{n \cdot \sum (\log X - \overline{\log X})^3}{(n - 1)(n - 2)(S \log X)^3}$$

Ck = koefisien kurtosis

$$= \frac{n^2 \cdot \sum (\log X - \overline{\log X})^4}{(n - 1)(n - 2)(n - 3)(S \log X)^4}$$

Tabel 7. Curah Hujan Rancangan Dengan Distribusi Log Pearson Tipe III

T	P(%)	Cs	G	Log X	X (mm)
2	50	0.4009	-0.0682	1.8640	73.1069
5	20	0.4009	0.8661	2.0314	107.5058
10	10	0.4009	1.3301	2.1146	130.2032
20	5	0.4009	1.7978	2.1985	157.9286
25	4	0.4009	1.8913	2.2152	164.1454
50	2	0.4009	2.2705	2.2832	191.9564
100	1	0.4009	2.6227	2.3463	221.9922

Sumber: Hasil Perhitungan

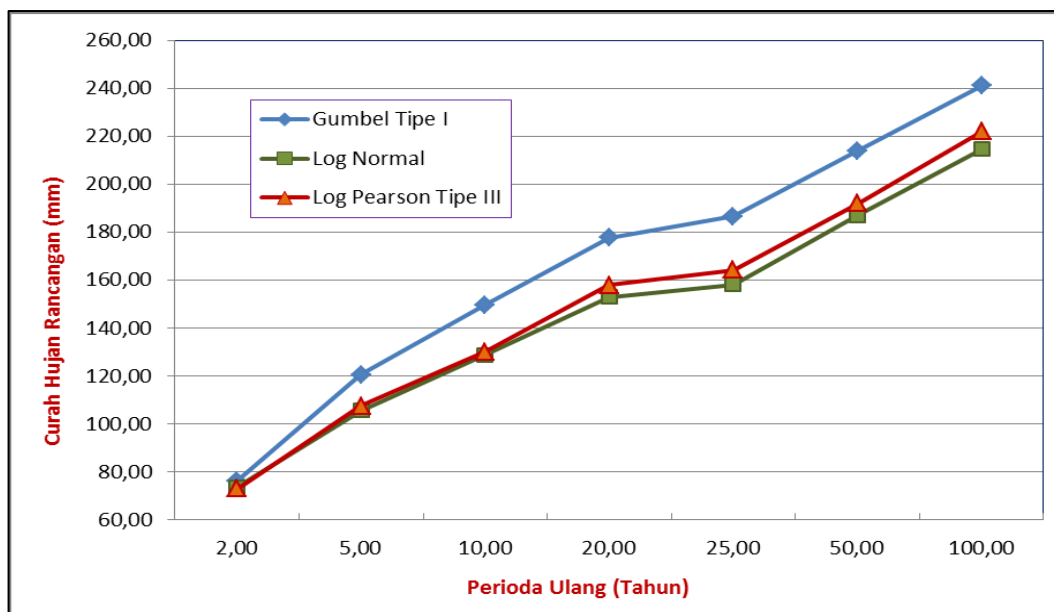
4. Rekapitulasi Curah Hujan Rancangan Untuk Tiap Jenis Distribusi

Rekapitulasi hasil perhitungan curah hujan rancangan dari tiap-tiap distribusi di atas dituangkan dalam Tabel 6 dan Gambar 1. Dalam perencanaan selanjutnya diambil nilai maksimum dari ketiga distribusi tersebut.

Tabel 8. Rekapitulasi Curah Hujan Rancangan Tiap Metode

No	Kala Ulang	Distribusi Gumbel Tipe I	Distribusi Log Normal 2 Parameter	Distribusi Log Pearson Tipe III	Maksimum
1	2	76.447	73.736	73.107	76.447
2	5	120.515	105.621	107.506	120.515
3	10	149.692	128.956	130.203	149.692
4	20	177.680	153.019	157.929	177.680
5	25	186.558	158.207	164.145	186.558
6	50	213.907	186.911	191.956	213.907
7	100	241.054	214.607	221.992	241.054

Sumber: Hasil Perhitungan



Gambar 2 : Hasil Analisis Perhitungan Curah Hujan Rancangan Harian

5.3 Aplikasi Komponen WSUD pada Lokasi-lokasi Pengembangan

Evaluasi terhadap lokasi-lokasi pengembangan telah menghasilkan ditetapkannya 5 (lima) lokasi pengembangan untuk dilakukan perencanaan dimana komponen WSUD akan diaplikasikan pada lokasi-lokasi tersebut sebagai sistem drainase berwawasan lingkungan. Proses evaluasi dan penentuan obyek penelitian berdasarkan kriteria-kriteria yang mendukung secara detil telah diuraikan pada sub bab 5.1.

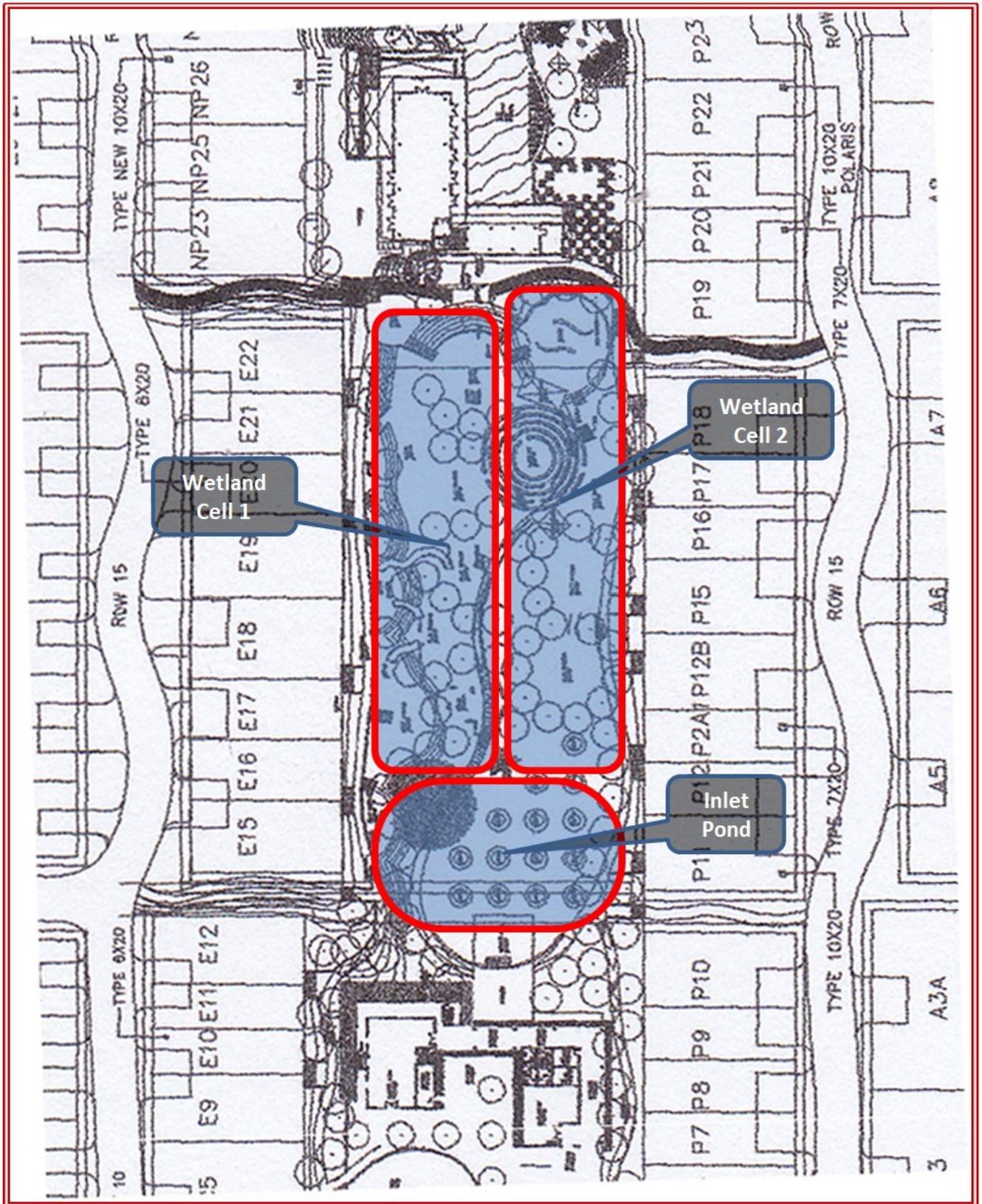
Setelah dilakukan evaluasi dan observasi lapangan, maka berdasarkan ketersediaan lahan, kecocokan fungsi dan kondisi topografi, hidrologi dan geologi permukaan (surface geology) ada beberapa komponen WSUD yang cocok dibuat untuk setiap lokasi pengembangan. Daftar komponen WSUD yang akan diaplikasikan untuk masing-masing lokasi pengembangan dituangkan pada Tabel 9 berikut ini:

Tabel 9: Komponen WSUD untuk Masing-masing Lokasi Pengembangan

Lokasi Pengembangan	Komponen WSUD
Grand Kawanua	Constructed Stormwater Wetland Detention Pond
Citra Land	Bioretention Swale Filter Strip
Grand Meridian	Bioretention Swale
Taman Sari Metropolitan	Detention Pond
Griya Paniki Indah	Detention Pond Infiltration System

Pada pelaksanaan kegiatan pengabdian Tahun I ini, komponen-komponen WSUD untuk masing-masing lokasi pengembangan pada tabel di atas telah dilakukan perencanaan berupa pra-desain. Pra-desain tersebut telah digambarkan, namun belum dihitung dimensi masing-masing komponen WSUD sesuai kebutuhan secara detail.

Gambar perencanaan pra-desain untuk lokasi pengembangan Grand Kawanua, yaitu berupa Constructed Stormwater Wetland (Rawa Air Hujan Buatan) diberikan pada Gambar 3.



Gambar 3: Pra-desain Constructed Wetland di lokasi pengembangan Grand Kawanua

5.4 Kemajuan Pekerjaan yang Telah dicapai

Kemajuan pekerjaan yang telah dicapai sejauh ini telah mencapai 100 % untuk rencana tahun ini dan dapat dimonitor dari rencana tahapan pelaksanaan pekerjaan sebagaimana diuraikan pada sub-bab 4.3. Dari rencana tahapan pelaksanaan pekerjaan tersebut, maka pelaksanaan pekerjaan untuk kondisi sampai dengan saat ini adalah seperti pada tabel 9.

Tabel 10: Progres Pekerjaan

Tahapan pelaksanaan pekerjaan	Progres yang telah dicapai
1) Pemantapan desain dan kerangka pelaksanaan penelitian. Output dari tahapan ini adalah diperolehnya rencana kerja yang jelas disesuaikan dengan waktu pelaksanaan.	Selesai
2) Survey institusional, untuk mengetahui kawasan-kawasan pembangunan baru berijin yang dapat dijadikan lokasi penelitian. Pada tahap ini akan dihasilkan daftar list kawasan-kawasan pembangunan baru dan data-data termasuk alamat para pengembangnya.	Selesai
3) Survey institusional pada kantor-kantor para pengembang kawasan pembangunan baru, untuk mendapatkan informasi mengenai penataan lay-out, peta-peta dan rencana-rencana pengembangan kawasan mereka.	Selesai
4) Survey lapangan awal, untuk mengetahui kondisi lapangan dari kawasan-kawasan pembangunan baru berijin serta prediksi kemungkinan penerapan sistem drainase berwawasan lingkungan. Survey ini menghasilkan hasil pengamatan visual berdasarkan lay-out, peta-peta/gambar-gambar dan rencana-rencana pengembangan kawasan. Konfirmasi	Selesai

<p>dimensi dan ukuran-ukuran juga akan diperoleh dalam survey lapangan awal ini.</p> <p>5) Penetapan kawasan-kawasan pembangunan baru yang akan dijadikan objek atau lokasi penelitian, yang dituangkan dalam daftar objek penelitian.</p> <p>6) Survey institusional, untuk mendapatkan data sekunder berupa:</p> <ul style="list-style-type: none"> - Kondisi daerah tangkapan hujan (catchment area) untuk tiap-tiap lokasi kawasan pembangunan baru, terutama kondisi lapisan tanah permukaan. - Peta topografi dari tiap kawasan pembangunan baru yang dipilih - Data curah hujan, diharapkan bisa diperoleh data curah hujan per menit oleh alat pengukur hujan otomatis dari stasiun-stasiun pengamatan hujan yang ada. <p>7) Penetapan sementara komponen-komponen struktur WSUD yang dapat diaplikasikan pada setiap lokasi/kawasan pembangunan baru.</p> <p>8) Kajian dan analisa kesesuaian setiap komponen struktur WSUD yang ditetapkan dengan unsur-unsur lain dari model pembangunan perkotaan (urban development) yang berwawasan lingkungan dan berkesinambungan.</p> <p>9) Analisa hidrologi, untuk mendapatkan debit banjir rencana dari tiap catchment struktur WSUD yang direncanakan.</p> <p>10) Analisa perkiraan laju kecepatan infiltrasi pada titik-titik dimana komponen struktur WSUD akan</p>	<p>Selesai</p> <p>Selesai</p> <p>Selesai</p> <p>Selesai</p> <p>Selesai</p> <p>Selesai</p> <p>Selesai</p> <p>Selesai</p>
-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

diletakkan berdasarkan kondisi lapisan tanah permukaan.	
11) Analisa hidrolika dari setiap komponen struktur WSUD yang direncanakan untuk menghasilkan parameter-parameter hidrolika yang diperlukan dalam analisa selanjutnya.	selesai
12) Penetapan dimensi setiap komponen struktur WSUD yang direncanakan. Dimensi dari komponen-komponen struktur WSUD yang dihasilkan ini merupakan luaran Pra-desain sistem drainase berwawasan lingkungan yang diusulkan.	selesai
13) Perhitungan estimasi biaya dari setiap komponen struktur WSUD yang diusulkan.	selesai

5.5 Luaran yang Telah dicapai

Kemajuan pekerjaan yang telah dicapai sejauh ini dapat dimonitor dari rencana tahapan. Dari kemajuan pelaksanaan pekerjaan, maka tabel berikut ini menjelaskan tentang luaran (output) menurut rencana dan progres luaran yang sampai dengan saat ini.

Tabel 11: Progres Luaran yang Telah Dicapai

Jenis Luaran	Progres Luaran
1) Pra-desain Sistem Drainase Berwawasan Lingkungan berdasarkan konsep WSUD, yang dituangkan dalam:	Selesai
2) Gambar-gambar pra-desain	Selesai
3) Estimasi biaya setiap komponen struktur WSUD yang diusulkan	Selesai

4) Hasil analisa hidrologi	Selesai
5) Hasil analisa hidrolika	Selesai
6) Hasil kajian terhadap kesesuaian dengan model pembangunan perkotaan (urban development) yang berwawasan lingkungan dan berkesinambungan.	Selesai
7) Pembuatan model	Selesai
8) Makalah yang dipresentasikan pada salah satu konferensi internasional.	Telah dipresentasikan pada SICEST 2016 Conference
9) Artikel yang dipublikasikan sebagai book chapter yang dipublikasikan secara internasional.	Book Chapter sudah dipublikasikan SPRINGER Internasional

BAB 6. RENCANA TAHAPAN BERIKUTNYA

6.1 Rencana Tahapan Pelaksanaan Tahun II

Pelaksanaan pekerjaan pada Tahun I telah memenuhi target, dimana semua rencana item kegiatan yang diproyeksikan untuk diselesaikan pada Tahun I telah selesai. Selanjutnya rencana pelaksanaan kegiatan pada Tahun II, yaitu tahun 2017 difokuskan pada item-item kegiatan yang diproyeksikan untuk dilaksanakan pada Tahun II, sebagaimana tertuang pada Bab 4, Metode Penelitian, lebih khusus pada sub bab 4.3, Tahapan Penelitian. Uraian tahapan kegiatan yang akan dilaksanakan dan diselesaikan pada Tahun II adalah sebagai berikut:

- 1) Survey dan konsultasi dengan para pengembang untuk secara bersama-sama memutuskan komponen struktur WSUD mana yang akan dibuatkan detail desainnya.
- 2) Survey pengukuran topografi dan pemetaan secara detail untuk memperoleh tata letak komponen struktur yang akan didetail desainkan.
- 3) Evaluasi dan hitung ulang analisa hidrologi disesuaikan dengan data hidrologi dan klimatologi terbaru untuk menetapkan debit rencana dari tiap catchment struktur WSUD yang direncanakan.
- 4) Analisa hidrolika untuk mendapatkan dimensi dari desain komponen struktur WSUD *Swale System*.
- 5) Pembelian software untuk menghitung dimensi komponen struktur WSUD *Infiltration System*.
- 6) Penetapan lokasi dan jumlah tes pit, dilanjutkan dengan pelaksanaan pembuatan test pit berukuran 1 meter x 2 meter dengan kedalaman 1,5 meter, untuk melakukan pengujian kapasitas laju infiltrasi.
- 7) Pelaksanaan pengujian laju infiltrasi pada test pit yang telah dibuat dengan menggunakan water truck.
- 8) Analisa hidrolika, untuk mendapatkan dimensi komponen struktur WSUD *Swale System* berdasarkan debit rencana yang dihitung dalam analisa hidrologi.
- 9) Running software untuk menghitung dimensi komponen struktur WSUD *Infiltration System*, berdasarkan data hasil pengujian laju infiltrasi pada test pit-test pit.
- 10) Simulasi dan modelling untuk mendapatkan dimensi komponen struktur WSUD *Retention Basin, Bioretention Basin dan Constructed Wetland*

- 11) Finalisasi desain komponen-komponen struktur WSUD yang sudah didimensi untuk dibuatkan Detail Desainnya.
- 12) Pembuatan Detail Desain Lengkap Sistem Drainase Berwawasan Lingkungan berdasarkan konsep WSUD.
- 13) Penggambaran Sistem Drainase Berwawasan Lingkungan yang didetail desainkan
- 14) Pembuatan spesifikasi teknik dari struktur WSUD yang direncanakan
- 15) Pembuatan metodologi pelaksanaan pekerjaan
- 16) Pembuatan rencana anggaran biaya
- 17) Pembuatan manual operasi dan pemeliharaan
- 18) Membuat kajian lingkungan terhadap rencana pembangunan sistem drainase berwawasan lingkungan yang dihasilkan, dimulai dari perioda pra konstruksi, pelaksanaan konstruksi dan perioda pasca konstruksi
- 19) Melakukan kajian komponen-komponen paralel lain dalam model pembangunan perkotaan yang berwawasan lingkungan dan berkesinambungan (sustainable urban development)

6.2 Rencana Luaran Tahun II

Tahapan pelaksanaan kegiatan pada tahun kedua direncanakan bermuara pada output yang dihasilkan berupa luaran-luaran sebagai berikut:

- (1) Detail Desain Lengkap Sistem Drainase Berwawasan Lingkungan berdasarkan konsep WSUD, yang terdiri dari
 - Gambar-gambar desain lengkap
 - Spesifikasi teknis dari setiap komponen yang direncanakan
 - Metodologi pelaksanaan pekerjaan
 - Rencana anggaran biaya
 - Manual operasi dan pemeliharaan
- (2) Hasil evaluasi dan justifikasi hasil analisa hidrologi dan hidrolika
- (3) Hasil kajian lingkungan terhadap rencana pembangunan sistem drainase berwawasan lingkungan yang dihasilkan, dimulai dari perioda pra konstruksi, pelaksanaan konstruksi dan perioda pasca konstruksi
- (4) Rekomendasi komponen-komponen paralel lain dalam model pembangunan perkotaan yang berwawasan lingkungan dan berkesinambungan (sustainable urban development)

- (5) Makalah yang dipresentasikan pada salah satu konferensi national atauj internasional
- (6) Artikel yang dipublikasikan pada salah satu jurnal nasional

BAB 7. Kesimpulan dan Saran

7.1 Kesimpulan

Konsep WSUD yang merupakan suatu sistem drainase yang berwawasan lingkungan di Australia, ternyata dapat diaplikasikan di Kota Manado, Provinsi Sulawesi Utara. Berbagai komponen WSUD berhasil direncanakan dalam tahapan penelitian ini, dimana untuk tahun pertama ini bertujuan untuk menghasilkan pra-desain perencanaan. Penerapan komponen WSUD berbeda-beda dari areal yang satu terhadap areal yang lain, semua itu tergantung faktor-faktor, situasi dan kondisi lokasi pengembangan.

Analisis berdasarkan kriteria-kriteria yang ditentukan menunjukkan hasil bahwa daerah pengembangan di Kota Manado cukup layak untuk dilakukan aplikasi konsep WSUD sebagai sistem drainase berwawasan lingkungan. Dari 9 lokasi pengembangan yang dievaluasi, Grand Kawanua (GK) memiliki nilai kesesuaian 92,5% dan yang terkecil dimiliki oleh Green Hill Residence (GHR) dan Paramount Hill (PH), itupun dengan nilai kesesuaian sebesar 60%. Dengan demikian dapat disimpulkan bahwa aplikasi konsep WSUD sebagai sistem drainase berwawasan lingkungan di Kota Manado sesuai untuk dilaksanakan.

7.2 Saran

Pelaksanaan penelitian ini difokuskan pada bagaimana menerapkan konsep WSUD di Kota Manado melalui pengaplikasian berbagai jenis komponen WSUD (WSUD devices). Disarankan agar penelitian selanjutnya dapat difokuskan pada setiap komponen WSUD, sehingga hasil penelitian dapat lebih mendalam atau lebih spesifik untuk masing-masing komponen WSUD.

DAFTAR PUSTAKA

1. Allison, R., Chiew, F. and McMahon, T., (1997), 'Stormwater Gross Pollutants', Industry Report, Clayton, Victoria, CRC for Catchment Hydrology.
2. Brown, R., (2005), 'Impediments to Integrated Urban Stormwater Management: The Need for Institutional Reform', *Environmental Management*, Vol. 36, No. 3, pp. 455-68.
3. Browne, D., Deletic, A., Mudd, G. M. and Fletcher, T. D., (2008), 'A new saturated/unsaturated model for stormwater infiltration systems', *Hydrological Processes*, Vol. 22, No. 25, pp. 4838-49.
4. Clar, M. L., Barfield, B. J. and O'Connor, T. P., (2004a), 'Stormwater Best Management Practice Design Guide, Volume 1: General Considerations', Cincinnati, OH: U.S. Environmental Protection Agency.
5. Clar, M. L., Barfield, B. J. and O'Connor, T. P., (2004b), 'Stormwater Best Management Practice Design Guide, Volume 3: Basin Best Management Practices', Cincinnati, OH: U.S. Environmental Protection Agency
6. Davis, A. P., Shokouhian, M., Sharma, H. and Minami, C., (2006), 'Water Quality improvement through bioretention media: nitrogen and phosphorus removal', *Water Environment Research*, Vol. 78, pp. 2177-85
7. Department of Water and Swan River Trust. (2007). 'Stormwater Management Manual for Western Australia: Structural Controls', edited by Torre, A. and Monk, E. Perth W. A.: Department of Water, Government of Western Australia.
8. Dietz, M. E. and Clausen, J. C., (2005), 'A field evaluation of rain garden flow and pollutant treatment', *Water, Air and Soil Pollution*, Vol. 167, No. 1-4, pp. 123-38
9. DCR, (1999), 'Virginia Stormwater Management Handbook', First Edition, Volume I, Richmond Virginia: Department of Conservation and Recreation, Division of Soil and Water Conservation.
10. Fiener, P. and Auerswald, K., (2005), 'Measurement and modeling of concentrated runoff in grassed waterways', *Journal of Hydrology*, Vol. 301, No. 1-4, pp. 198-215.
11. Gardiner, A. and Hardy, M., (2005), 'Beyond demonstration mode: the application of WSUD in Australia', *Australian Planner*, Vol. 42, No. 4, pp. 16-21.
12. Goonetilleke, A. and Thomas, E., (2003), 'Water quality impacts of urbanisation: Evaluation of current research', Departmental Technical Report, Centre for Built Environment and Engineering Research, Queensland University of Technology, pp. 1-93.
13. Goonetilleke, A., Thomas, E., Ginn, S. and Gilbert, D., (2005), 'Understanding the role of land use in urban stormwater quality management', *Journal of Environmental Management*, Vol. 74, No. 1, pp. 31-42.

14. Herngren, L., Goonetilleke, A. and Ayoko, G. A., (2006), 'Analysis of heavy metals in road-deposited sediments', *Analytica Chimica Acta*, Vol. 571, No. 2, pp. 270-8.
15. Hunt, W. F., III, (2003), 'Pollutant removal evaluation and hydraulic characterization for bioretention stormwater treatment devices', Ph.D. Thesis, The Pennsylvania State University, United States -- Pennsylvania.
16. Hunt, W. F., Jarrett, A. R., Smith, J. T. and Sharkey, L. J., (2006), 'Evaluating bioretention hydrology and nutrient removal at three field sites in North Carolina', *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, Vol. 132, No. 6, pp. 600–8.
17. Lloyd, S. D., Wong, T. H. F. and Chesterfield, C. J., (2002), 'Water Sensitive Urban Design - A Stormwater Management Perspective', Industry Report 02/10, Melbourne, Cooperative Research Centre for Catchment Hydrology
18. Mouritz, M., Evangelisti, M. and McAlister, T., (2006), 'Water sensitive urban design', In *Australian runoff quality : a guide to water sensitive urban design*, ed. Wong, T. H. F., [Crowst Nest N.S.W.: Engineers Media for Australian Runoff Quality Authorship Team], pp. 4.1 - 4.26
19. Prakash, A., (2005), 'Impact of urbanization in watersheds on stream stability and flooding', *Proceedings of the Watershed Management Conference (eds)*, Williamsburg, Virginia.
20. Victorian Stormwater Committee, (1999), 'Urban stormwater: Best practice environmental management guidelines', Collingwood VIC: CSIRO Publishing
21. Wong, T. H. F., (2000), 'Improving Urban Stormwater Quality – From Theory to Implementation', *Water – Journal of the Australian Water Association*, Vol. 27, No. 6, pp. 28-31.
22. Wong, T. H. F., (2006), 'Australian runoff quality: a guide to water sensitive urban design', Crows Nest, N.S.W.: Engineers Media for Australian Runoff Quality Authorship Team, Institution of Engineers Australia

Lampiran 1: Artikel dipresentasikan pada Konferensi Internasional SICEST 2016

SICEST2016

ISBN 979-587-621-1

PROCEEDINGS

SRIWIJAYA INTERNATIONAL
CONFERENCE ON ENGINEERING,
SCIENCE & TECHNOLOGY
[SICEST 2016]

Bangka Island Indonesia, 8-10 November 2016



A Conference by
Faculty of Engineering
Sriwijaya University



SICEST2016
Bangka Island-Indonesia, 8-10 November 2016



TABLE OF CONTENTS

SICEST2016 Overview	i
Authors Affiliation	ii
Welcome notes	iv
Table of Contents	vi
Board of Editors	xiii
Steering and Scientific Committee	xiv
Remarks from Organizing Committee Chairman	xvi
Organizing Committee	xiv
Acknowledgement	xvii
Program at a Glance	xviii
Plenary Session	xix

CIVIL ENGINEERING

Risk Allocation in Performance Based Contract Clauses for National Road Maintenance Project in Indonesia Deni Setiawan, Reini D. Wirahadikusumah, and Krishna S. Pribadi	1
Dominant Factor Causes of Construction Waste in the Indonesian Construction Project Elizar, Suripin and M.Agung Wibowo	5
The Effect of The Plate Numbers Toward The Compression Bearing Capacity Of Helical Piles in Peat Soil Ferry Fatnanta, Muhardi, and Parlan	9
The Investigation of El Nino Impacts on Rainfall in Lampung Province – Indonesia Gatot Susilo, Eka Desmawati and Ankavisi Nalaralagi	14
Sustainable Development: Early Age Strength of HSC Using Fly Ash to Replace Part of Cement Gidion Turuallo and Harun Mallisa	18
Quantification of Emission Rates of NO _x based on Engine on Equipment and Engine Tier Types for Diesel Construction Equipment Heni Fitriani and Phil Lewis	22
Quality of Experience on Toll Roads: Road Condition and Travel Time Herry Trisaputra Zuna and Naya Cinantya Drestalita	25
Simplified Hydraulic Conceptual Model for Stormwater Treatment Bioretention Basin Isri Ronald Mangangka	29
Improving Mortar Properties in Saline Environment Jauhar Fajrin, Pathurahman and Lalu Gita Pratama	35

Simplified Hydraulic Conceptual Model for Stormwater Treatment Bioretention Basin

Isri Ronald Mangangka*

Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Sam Ratulangi University, Manado 95115, Indonesia,

Abstract: A bioretention basin performs as a pollutant removal device using filtration as the main mechanism, supported by evapotranspiration, absorption and biotransformation. This is in addition to attenuation of runoff peak flow and reduction of runoff volume through detention and retention [1]. Past studies have reported that pollutant concentration reduction in bioretention basins is poor for a range of pollutant species particularly for nutrient species [1][2][3][4]. However, a substantial reduction in outflow volume can lead to significant reduction in pollutant loads [5].

A range of studies have been conducted for assessing bioretention basin performance and hydraulic and pollutant removal processes [6][7][8][9][10][11][12]. However, most of the past field studies have been conducted to evaluate the long term treatment performance while most of the studies which focused on developing an in-depth understanding of processes have been conducted using laboratory-scale models [13][14][15]. This has resulted in knowledge gaps relating to field performance and associated pollutant removal processes in relation to bioretention basins.

As a part of this study, a selected operating bioretention basin was evaluated for its hydraulic processes. This paper focuses on the development of bioretention basin hydraulic conceptual model. The model utilises a range of conceptual approaches and empirical equations. The model replicates the infiltration processes through the filter media and water movement within the system from the inlet to the outlet. The model was successfully calibrated using on-site recorded inflow and outflow data.

Keywords: Bioretention Basin, bioretention model, hydraulic conceptual model.¹

e-mail: isri.mamangka@unsrat.ac.id*

1. INTRODUCTION

Hydraulic processes play an important role in stormwater pollutants removal by bioretention basins. As pointed out by numerous researchers (for example [6] and [8]), hydraulic factors such as residence time and outflow discharge are the most critical. These factors can be obtained using design configurations in event-based assessment. However, in-depth assessments which require variation of these factors within an event require a modelling approach to generate the relevant hydraulic factors. Due to this reason, a conceptual model was developed to estimate hydraulic factors in short time steps. The developed model contains a range of conceptual approaches and empirical equations. The model was developed to replicate stormwater infiltration through the filter media, and water movement from the drainage layer exiting the bioretention basin through the perforated pipes.

2. THE PRINCIPLES AND ASSUMPTIONS ADOPTED FOR THE MODEL

Hydraulic characteristics of a bioretention basin are primarily based on infiltration and percolation of stormwater through the filter media and can be classified as typical subsurface flow. Subsurface flow can be best replicated by 3-dimensional flow models, which are very complex and often requires numerical analysis [16]. To reduce this complexity, a range of assumptions was made, primarily to convert a 3-dimensional flow system to a 1-dimensional flow system. In the conceptual model, the bioretention basin was divided into a number of equal zones. A trial and error process used suggested that 10 equal zones were suitable for the model (see Figure 1). The stormwater movement over the surface was as a flow from zone 1 where the inlet structure was located to zone 10 where the outlet structure was located. Each zone with 24.8 m² surface area was considered to be a soil column in which the water flows downward to replicate the infiltration process. When the stormwater flows on the surface of the assumed soil column exceeds the infiltration capacity of the soil, the excess runoff was assumed to be surface flow to the next zone.

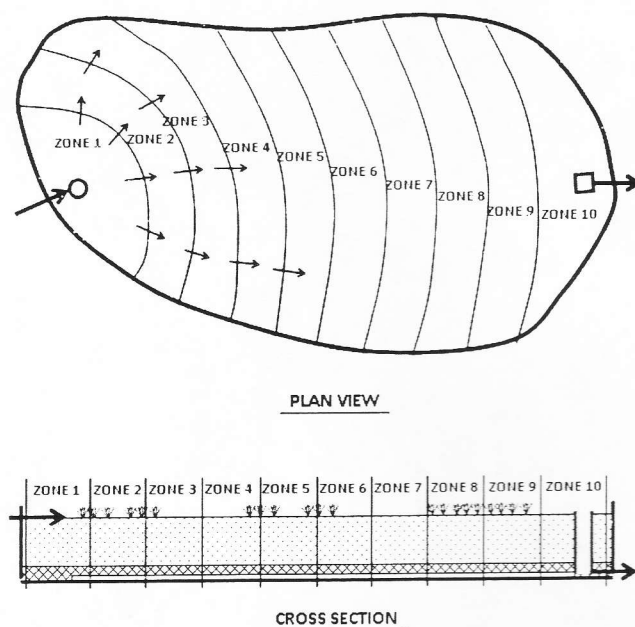


Fig. 1. Simplifying 3-dimensional flow into 1-dimensional column based flow

The stormwater flow within the bioretention basin (see Figure 2) was modelled according to the processes described in the following steps:

- Stormwater runoff enters the bioretention basin through the inlet structure in zone 1 which is assumed as a soil column (1).
- The stormwater runoff then infiltrates into the soil column (2). This is replicated using the infiltration model.

- When the inflow rate is higher than the soil column infiltration capacity, the excess runoff becomes surface flow to the next soil column (3).
- The infiltrated water then percolates until it reaches the drainage layer in which the stormwater is temporarily stored (4).
- Part of stormwater stored in the drainage layer percolates to the original soil layer underneath (5).
- Through perforated pipes, stormwater in the drainage layer flows to the outlet structure where the outflow was monitored (6).

3. MODELLING THE INFILTRATION PROCESS IN THE SOIL COLUMN FILTER MEDIA

The soil column is considered as a system where water balance can be applied. This means water entering and leaving the system is subject to the water balance concept. In this way, cross interaction between columns and its surrounding columns were considered negligible. Therefore, any possible seepage flow from groundwater and infiltration into the sidewall is negligible. This is acceptable since the soil surrounding the system is silty clay with low infiltration rate. Adopting the water balance approach, the soil column was considered as a storage. The storage volume was replicated to increase or decrease depending on the volume of stormwater entering and leaving the storage. This action was replicated using a standard storage equation in the form of (1).

$$\Delta S = S_{t+\Delta t} - S_t = I \cdot \Delta t - O \cdot \Delta t \quad (1)$$

- Where ΔS = change in storage volume (m³)
 Δt = time interval (sec)
 S_t = storage volume (m³) at the beginning of the time interval Δt
 $S_{t+\Delta t}$ = storage volume (m³) at the end of the time interval Δt
 I = inflow discharge rate (m³/sec)
 O = outflow discharge rate (m³/sec)

The input to the system was infiltration while the output components of the system are percolation to the drainage layer underneath and evapotranspiration. Infiltration is considered to be influenced by factors such as soil moisture content, porosity, soil hydraulic conductivity and soil surface condition including vegetation cover. A range of equation formats are available to replicate the infiltration process such as equations proposed by [17][18][19]. All these equation formats were reviewed and Philip and Green-Ampt models were preferred for this study. This is due to the capability of Philip and Green-Ampt models to incorporate soil (media) characteristics in the equation rather than the pure mathematical format adopted in Horton's infiltration model. However, since the Green-Ampt model requires a lesser number of variables compared to the Philip model, the Green-Ampt model was chosen for the conceptual model developed.

The principle of Green-Ampt model is based on continuity and momentum [16]. The conceptual format in which the Green-Ampt equation was applied in this study is presented in Figure 3. Considering the zone 1 soil column as a vertical soil column (see Figure 3 (a)), the control volume was defined as the volume of the soil column from the surface to depth L (see Figure 3 (b)). As the wetting front progresses, the moisture content θ will increase from the initial value θ_i to η (porosity). When θ equals η , the soil is fully

saturated. When L equals the thickness of the filter media (m), the whole filter media is considered fully saturated. In this condition, the wetting front fully passes the whole filter media and reaches the drainage layer. Accordingly, infiltration is replaced by percolation. The cumulative water depth infiltrating into the soil is expressed by (2) [16].

$$F(t) = L(\eta - \theta_i) \quad (2)$$

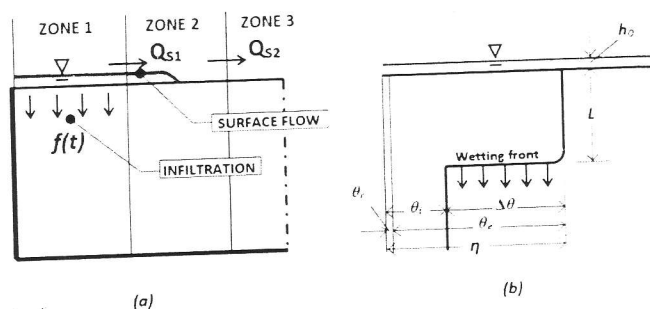


Fig. 3. Vertical soil column and Green-Ampt infiltration model variables (Figure 3 (b) adapted from [16])

The developed model divides the infiltration process into two phases. Phase 1 starts from the beginning of the infiltration process until it reaches the drainage layer. Phase 2 is the phase when the infiltrated stormwater contributes to the storage volume in the drainage layer. In this instance, the drainage layer was considered as the second storage. The stormwater entering and leaving this second storage was also replicated using the water balance approach with a standard storage equation in the form of (1). Detail modelling of phase 1 and phase 2 are explained further as follows:

Phase 1

When the stormwater inflow from the catchment enters zone 1 or the exceeded surface flow enters the next zone, the stormwater begins to infiltrate into the soil column of the zone at a certain infiltration rate. The actual infiltration rate is equal to the inflow rate, if the inflow rate is less than the infiltration rate capacity of the soil column. However, if the inflow rate is greater than the infiltration rate capacity, the actual infiltration rate is equal to the infiltration rate capacity. The infiltration rate capacity was calculated using (3) [16].

$$f(t) = k_s \cdot \left(\frac{\psi \Delta \theta}{F(t)} + 1 \right)$$

- Where: $f(t)$ = The infiltration rate capacity (m/h)
 $F(t)$ = Cumulative infiltration (m)
 k_s = Hydraulic conductivity or saturated soil permeability coefficient (m/h)
 ψ = Wetting front soil suction head (m)
 $\Delta \theta$ = The difference between the initial water content and saturated water content or porosity (η)

The equation for infiltration rate capacity (3) can be reformulated for cumulative infiltration capacity equation in the form of (4)[16]. Equation format shown in (4) requires iterative solutions to obtain cumulative infiltration capacity $F(t)$.

$$F(t) = k_s \cdot t + \psi \Delta \theta \cdot \ln \left(1 + \frac{F(t)}{\psi \Delta \theta} \right) \quad (4)$$

Where: t = Time elapsed (h)

Phase 2

Phase 2 begins when the wetting front reaches the drainage layer and the stormwater in the filter media starts draining to the drainage layer. It is indicated by the cumulative infiltration capacity calculated using (4) equals the cumulative infiltration obtained using (2). This is known as percolation, which is the movement of water downward in a media which is promoted by gravitational forces. The percolation of stormwater from the filter media to the drainage layer was also divided into two conditions. The first condition is when the filter media is still unsaturated while the second condition is when the filter media is fully saturated. The percolation rate in the second condition was replicated using saturated coefficient of permeability k_s . Therefore, the volume of water which percolates during the modelling time interval Δt can be written as (5).

$$V_{W\Delta t} = k_s \cdot \Delta t \times A \quad (5)$$

Where: $V_{W\Delta t}$ = Volume of water percolating from filter media column (m^3)
 Δt = Time interval (h)
 A = Cross sectional area of the filter media column (m^2)

When the filter media is not fully saturated, the saturated soil permeability coefficient, k_s in (5) is replaced by k_w , as presented in (6).

$$V_{W\Delta t} = k_w \cdot \Delta t \times A \quad (6)$$

Where: k_w = Unsaturated soil permeability coefficient (m/h)

To obtain an accurate unsaturated soil permeability coefficient k_w , a field or laboratory experiment is required. However, [20] has proposed an approximate method to obtain values for k_w , which is presented in (7).

$$k_w = k_s \times S_e^\delta \quad (7)$$

Where: S_e = Effective saturation of soil
 δ = An empirical constant, expressed by
 $\delta = (2 + 3\lambda) / \lambda$, where λ is the pore size distribution index

Reference [21] suggested pore size distribution index (λ) as equal to infinity for uniform sand, resulting 3.0 for empirical constant (δ). For natural sand deposits, reference [22] suggested $\lambda = 4.0$, resulting in a δ value of 3.5, while for soil and porous rock, reference [23] proposed 2.0 for λ , resulting in a δ value of 4.0. The developed bioretention basin used $\lambda = 10$ which gives $\delta = 3.5$. This value was obtained from the calibration.

The effective saturation S_e is the ratio of the available moisture content $\theta - \theta_r$ to the maximum possible available moisture content $\eta - \theta_r$. It is written in the form of (8)[16].

$$S_e = \frac{\theta - \theta_r}{\eta - \theta_r} \quad (8)$$

Where: S_e = Effective saturation of soil
 θ = Moisture content
 θ_r = The residual moisture content of soil after it has thoroughly drained
 η = Porosity

The maximum possible available moisture content is called the effective porosity, reflected by $\eta - \theta_r = \theta_e$. The effective saturation, S_e was monitored during the modelling period to evaluate whether the filter media is in unsaturated or saturated condition. Once the value of S_e reaches 100%, the filter media is considered to be saturated.

4. WATER LOSSES DUE TO PERCOLATION

Since the type of soil underneath the bioretention basin is silty clay with a very low percolation rate, a constant percolation rate of 1.8×10^{-6} m/h as suggested by [24] was applied in the model throughout the bioretention basin area. However, during model calibration, this percolation rate was adjusted to obtain better results.

5. DIRECT PRECIPITATION

Direct precipitation is rainfall which directly falls on the bioretention basin surface and the area surrounding the bioretention basin without entering through the inlet measurement device. The amount of direct precipitation for a certain duration is considered as the rainfall depth for that duration multiplied by the bioretention basin surface area. In the case where the rainfall falls on the surroundings of the bioretention basin area and the runoff produced does not flow through the inlet measurement device, but seeps through the bioretention basin, runoff was estimated by applying a runoff coefficient. The initial runoff coefficient of 0.7 was considered appropriate to compensate for the loss of water due to interception and infiltration. However, this value was adjusted during model calibration.

6. MODELLING THE FLOW THROUGH PERFORATED PIPES TO OUTLET

Flow through the perforated pipes was modelled as flow in a circular open channel. Initially, this flow was assumed as laminar and later confirmed after calibration. The flow at the end of the perforated pipe near the outlet was also assumed as uniform and steady. This assumption was based on the fact that the longitudinal slope of the perforated pipe is very small (0.005).

Flow through a circular open channel is explained by a range of researchers such as by [25][26][27][28] and [29]. Based on the suggestions provided in literature, Manning's equation, in the form of (9), was used to simulate flow through the perforated pipes in the model developed.

$$Q = \frac{k}{n} \times A \times R^{2/3} \times S^{1/2} \quad (9)$$

Where: Q = Discharge (m^3/sec)
 k = Conversion factor ($m^{1/3}/sec$)
 n = Manning's coefficient
 A = Wetted cross sectional area of the circular pipe (m^2)
 R = Hydraulic radius of the wetted cross sectional area (m)
 S = Slope of the hydraulic grade line (equal to the longitudinal slope for uniform flow)

The internal surface of the perforated pipe was considered as rough due to the presence of perforations. Therefore, the Manning's roughness coefficient in the range of 0.012 to 0.017 was initially used [29]. The actual Manning's coefficient was obtained from the calibration.

7. CALIBRATION OF THE MODEL

Finalised model parameters were obtained by model calibration. Calibration was undertaken to obtain model parameters ensuring that the model was performing as close as possible to the stormwater bioretention basin system. It was primarily a trial and error changing of parameters until outputs reach best visual fit to the measured outcomes [30][31]. The method is widely used and commonly recommended for complex models [32][33][34].

In order to obtain a good comparison during the calibration process, a noise suppression technique was required to reduce the data noise due to the sensitivity of the pressure sensor reading the fluctuating water depth in the V-notch weir boxes. In this study, the average method was used for noise suppression, by averaging several data points before and after each data point as a corrected data point. The typical hydrographs before and after reducing noise using the averaging method are shown in Figure 4.

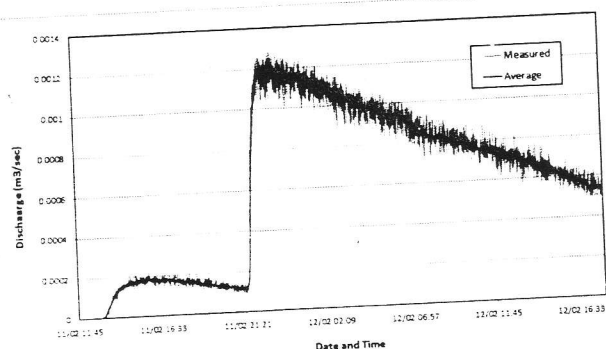


Fig. 4. Hydrograph before and after noise suppression

The model calibration was done using data from twelve storm events during April 2008 to March 2011 period [35], and the calibration results were found to be satisfactory [36]. To assess the accuracy of the calibrated model, the study adopted a well-known statistical analysis method developed based on the regression analysis technique [37][38]). In this method, coefficient of determination (R^2) which can be used to measure the 'goodness-of-fit' of the estimated model is calculated based on regression residual by taking time as the independent variables. The residual (\hat{u}_i) associated with each paired data values (measured and model) is the vertical distance between the measured value (y_i) and model value (\hat{y}_i) which can be written as $\hat{u}_i = y_i - \hat{y}_i$ (see Figure 5) [38].

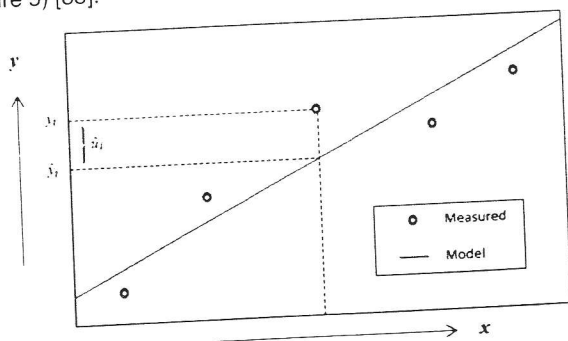


Fig. 5. Regression residual (Adapted from [38])

The R^2 value is calculated using (10) [37].

$$R^2 = 1 - \frac{SSR}{SST} = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2}{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2} \quad (10)$$

- Where:
- R^2 = Coefficient of determination
 - SSR = The sum of the squared residuals and can be expressed as $SSR = \sum (y_i - \hat{y}_i)^2 = \sum \hat{u}_i^2$
 - SST = Total sum of squares and can be expressed as $\sum (y_i - \bar{y})^2$.
 - y_i = Measured value of dependent variable
 - \hat{y} = Model value of dependent variable
 - \bar{y} = Mean value of dependent variable

The sum of squared residuals (SSR) represents the residuals/errors of the model to the measured data while the total sum of squares (SST) represents the variation of the dependent variable around its mean. Therefore, $\frac{SSR}{SST}$ can be defined as the proportion of the residual to the variation in the dependent variables. R^2 can be written as 1 minus the proportion of the residual to the variation in the dependent variable and must be bounded by 0 and 1 ($0 \leq R^2 \leq 1$). The higher the R^2 value, the better the model or the closer the value of R^2 to 1, the closer the model to the data points [38].

An example of a typical analytical result showing the goodness-of-fit of the developed wetland conceptual model hydrograph for the measured data is presented in Figure 6.

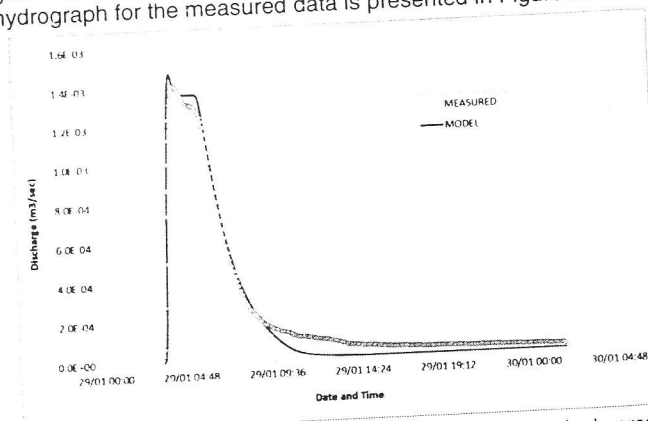


Fig. 6. Bioretention basin measured and modelled discharge hydrograph

The coefficient of determination (R^2) calculated for twelve monitored rainfall events are shown in Table 1.

Table 1. The goodness-of-fit, coefficient of determination R^2

No.	Rainfall event	R^2
1	29-01-2008	0.89
2	03-02-2008	0.91
3	17-03-2008	0.92
4	18-04-2008	0.91
5	29-05-2008	0.92
6	22-01-2009	0.94
7	29-01-2010	0.98
8	18-04-2010	0.91
9	23-06-2010	0.92
10	19-07-2010	0.88
11	02-03-2011	0.93
12	29-03-2011	0.94
Average		0.92

Note: Minimum $R^2 = 0.88$, maximum $R^2 = 0.98$ and average $R^2 = 0.92$ (printed in bold)

Table 1 shows that the R^2 ranges from 0.88 to 98 with an average of 0.92. This range was considered satisfactory. This suggests that the approaches adopted in the model development are appropriate.

Based on the trial and error procedure, the parameters were adjusted during the calibration and the best fit parameters were obtained for the developed model. The parameters obtained and their final values are given below:

- Hydraulic conductivity of the filter media	: 0.025 m/hr
- Wetting front soil suction head, ψ	: 0.167 m
- Porosity of the filter media, η	: 0.501
- Pore size distribution index, λ	: 10
- Percolation rate of soil underneath the basin	: 5×10^{-5} m/hr
- Manning's coefficient of the perforated pipe	: 0.015
- Runoff coefficient	: 0.7

7. CONCLUSION

The treatment processes of stormwater in a bioretention basin are influenced by a range of hydraulic factors. However, these influential factors may vary during an event and the variation can be generated using a detailed modelling approach. Therefore, in this study a hydraulic conceptual model of bioretention basin which is capable to replicate the hydraulic conditions within the wetland was developed. The model was calibrated using trial and error procedure which is the most robust procedures available.

The model was simplified from 3-dimension flow system to a 1-dimensional flow system. However, the approaches adopted to develop the bioretention basin hydraulic conceptual model in this study are satisfactory. The average coefficient of determination of model-measured outflow discharge, R^2 of 0.92 confirms the suitability of the model developed to simulate hydraulic factors.

REFERENCES

- [1] Davis, A. P., Shokouhian, M., Sharma, H. and Minami, C., 2006, 'Water Quality improvement through bioretention media: nitrogen and phosphorus removal', *Water Environment Research*, Vol. 78, pp. 2177-85.
- [2] Hatt, B. E., Deletic, A. and Fletcher, T. D., 2007, 'Stormwater reuse: designing biofiltration systems for reliable treatment', *Water Science Technology*, Vol. 55, No. 4, pp. 201-9.
- [3] Henderson, C., Greenway, M. and Phillips, I., 2007, 'Removal of dissolved nitrogen, phosphorus and carbon from stormwater by biofiltration mesocosms', *Water Science and Technology*, Vol. 55, No. 4, pp. 183-91.
- [4] Greenway, M. 2008. 'The role of media, microbes and macrophytes in improving the effectiveness of bioretention systems, have we got it right?'. In SIA Stormwater Conference. Gold Coast.
- [5] Hunt, W. F., Jarrett, A. R., Smith, J. T. and Sharkey, L. J., 2006, 'Evaluating bioretention hydrology and nutrient removal at three field sites in North Carolina', *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, Vol. 132, No. 6, pp. 600-8.
- [6] Davis, A. P., 2007, 'Field Performance of Bioretention: Water Quality', *Environmental Engineering Science*, Vol. 24, No. 8, pp. 1048-64.
- [7] Davis, A. P., 2008, 'Field performance of bioretention: Hydrology impacts', *Journal of Hydrologic Engineering*, Vol. 13, No. 2, pp. 90-5.
- [8] Dietz, M. E. and Clausen, J. C., 2005, 'A field evaluation of rain garden flow and pollutant treatment', *Water, Air and Soil Pollution*, Vol. 167, No. 1-4, pp. 123-38.
- [9] He, Z., Davis, A. P. and Asce, F., 2011, 'Process Modeling of Storm-Water Flow in a Bioretention Cell', *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, Vol. 137, No. 3, pp. 121-31.
- [10] Heasom, W., Traver, R. G. and Welker, A., 2006, 'Hydrologic modeling of a bioretention best management practice', *Journal of the American Water Resources Association*, Vol. 42, No. 5, pp. 1329-47.
- [11] Hsieh, C. H. and Davis, A. P., 2005, 'Evaluation and optimization of bioretention media for treatment of urban stormwater runoff', *Journal of Environmental Engineering*, Vol. 131, No. 11, pp. 1521-31.
- [12] Hsieh, C. H., Davis, A. P. and Needelman, B. A., 2007b, 'Nitrogen removal from urban stormwater runoff through layered bioretention columns', *Water Environment Research*, Vol. 79, No. 12, pp. 2404-11.
- [13] Hsieh, C.-h., Davis, A. P. and Needelman, B. A., 2007a, 'Bioretention column studies of phosphorus removal from urban stormwater runoff', *Water environment research : a research publication of the Water Environment Federation*, Vol. 79, No. 2, pp. 177-84.
- [14] Moore, J. R., 2008, 'Effect of compaction on removal efficiency of lead, copper, zinc, nitrate, and phosphate in a bioretention system a column study' Thesis.
- [15] Zhang, L., Seagren, E. A., Davis, A. P. and Karns, J. S., 2011, 'Long-term sustainability of Escherichia coli removal in conventional bioretention media', *Journal of Environmental Engineering*, Vol. 137, No. 8, pp. 669.
- [16] Chow, V. T., Maidment, D. R. and Mays, L. W., 1988, 'Applied hydrology'. Ed. Clark, B. J. and Morriss, J., New York: McGraw-Hill, Inc.
- [17] Horton, R. E., 1933, 'The role of infiltration in the hydrologic cycle', *Trans. Am. Geophys. Union*, Vol. 14, pp. 446-60.
- [18] Philip, J. R., 1957, 'The theory of infiltration: 1. The infiltration equation and its solution', *Soil Sci.*, Vol. 83, No. 5, pp. 345-57.
- [19] Green, W. H. and Ampt, G. A., 1911, 'Studies on soil physics, part I, the flow of air and water through soils', *Agric. Sci*, Vol. 4, No. 1, pp. 1-24.
- [20] Brook, R. H. and Corey, A. T., 1964, 'Hydraulic properties of porous
- [21] Irmay, S., 1954, 'On the Hydraulic Conductivity of Unsaturated Soils', *Trans. AGU*, Vol. 35, No.3, pp. 463-467
- [22] Averjanov, S. F., 1950, 'About permeability of subsurface soils in case of complete saturation', *English Collection*, Vol. 7, pp. 19-21.
- [23] Corey, A. T., 1977, *Mechanics of Heterogeneous Fluids in Porous Media*, Water Resources Pubs., Fort Collins, Colorado
- [24] Lambe, T. W. and Whitman, R. V., 1969, 'Soil mechanics', New York: John Wiley and Sons, Inc.
- [25] Chow, V. T., 1959, 'Open Channel Hydraulics', New York: McGraw-Hill Book Company.

- [26] Akan, A. O., 2006, 'Open Channel Hydraulics', First Edition, Oxford: Elsevier Butterworth-Heinemann.
- [27] Chanson, H., 2004, 'The Hydraulics of Open Channel Flow: An Introduction', Second Edition, Oxford: Elsevier Butterworth-Heinemann.
- [28] Sturm, T. W., 2001, 'Open Channel Hydraulics', New York: McGraw-Hill.
- [29] Han, D., 2008, 'Concise Hydraulics': Ventus Publishing.
- [30] Gupta, H. V. and Sorooshian, S., 1998, 'Toward improved calibration of hydrologic models: Multiple and noncommensurable measures of information', *Water Resources Research*, Vol. 34, No. 4, pp. 751-63.
- [31] Li, X. and Yeh, A. G.-o., 2002, 'Neural-network-based cellular automata for simulating multiple land use change using GIS', *International Journal of Geographical Information Science*, Vol. 16, No. 4, pp. 323-43.
- [32] Abbott, M. B. and Refsgaard, J. C., 1996, 'Distributed Hydrological
- [33] Yu, Z. and Schwartz, F. W., 1998, 'Application of an integrated basin-scale hydrologic model to simulate surface-water and ground-water interactions', *Journal of the American Water Resources Association*, Vol. 34, No. 2, pp. 409-25.
- [34] James, L. D., 1972, 'Hydrologic modeling, parameter estimation, and watershed characteristics', *Journal of Hydrology*, Vol. 17, No. 4, pp. 283-307.
- [35] Mangangka, Isri Ronald, 2013, 'Role of Hydraulic Factors in Constructed Wetland and Bioretention Basin Treatment Performance', Ph.D. Thesis, Queensland University of Technology, Brisbane, Australia.
- [36] Mangangka Isri R., Liu An, Goonetilleke Ashantha, Egodawatta Prasanna (2016), 'Creating Conceptual Models of Treatment Systems, in Enhancing the Storm Water Treatment Performance of Constructed Wetlands and Bioretention Basins. pp. 15-38., Singapore: Springer Singapore.
- [37] Chatterjee, S. and Hadi, A. S. 2006. 'Regression Analysis by Example'. Hoboken: Wiley-Interscience.
- [38] Rawlings, J. O., Pantula, S. G., and Dickey, D. A., I., 1998, 'Applied regression analysis: a research tool', New York: Springer.

Lampiran 2: Publikasi Book Chapter yang diterbitkan oleh SPRINGER Internasional

Chapter 4

Assessing Constructed Wetland Treatment Performance

Abstract This chapter presents the assessment of the constructed wetland treatment performance. The assessment was done by partitioning the inflow runoff hydrograph into ten segments and then investigating the treatment performance of each runoff segment within a constructed wetland. Accordingly, the hydrologic and hydraulic factors generated by the conceptual model were also appropriately allocated to the ten segments. The analysis outcomes showed that large and small rainfall events are differently treated in a constructed wetland. The pollutant load reductions for the initial sector of runoff from large rainfall events were relatively low, due to the rapid mixing taking place within the system. This highlights the need to establish an inlet pond prior to the flow entering the constructed wetland, so that the inflow will initially stabilise. This is also supported by the fact that the initial sector of runoff generally carries higher pollutant loads.

Keywords Constructed wetlands • Inflow runoff hydrograph • Storm water quality • Treatment performance • Hydrologic and hydraulic factors

4.1 Background

A diverse range of processes are involved in storm water treatment in a constructed wetland including gravity settling of particulates, filtration, adsorption, vegetation uptake and biological decomposition. These processes are affected by a range of hydraulic factors such as hydraulic loading, retention time, depth of water, and quality and quantity characteristics of the inflows. The effective design of a constructed wetland closely relies on the in-depth understanding of the relationship between hydrologic and hydraulic factors and treatment performance.

Unlike a bioretention basin, which is commonly dry between storm events and its treatment efficiency primarily relies on the degree of dryness of the filter media (as discussed in Chap. 3), a constructed wetland is a water body which commonly pools to a certain depth all the time (refer to Sect. 1.2.6 in Chap. 1). When a rainfall event occurs, the inflow continuously enters the wetland system and mixes with the

previously retained water (Mangangka et al. 2014). Mixing can occur during the whole period of the runoff event. This could result in differences in storm water treatment performance during the different sectors of a runoff event. This potential phenomena needs to be viewed in the context of the occurrence of first flush, which refers to a relatively higher pollutant load at the initial part of a runoff event and hence relatively more polluted storm water that will enter the system in the early sectors of the runoff hydrograph (Liu et al. 2010; Alias et al. 2014a, b). In this regard, first flush alone could lead to differences in treatment performance between early and later parts of the runoff hydrograph. In-depth understanding of these differences in treatment performance will contribute to the design of more efficient constructed wetland systems.

This chapter presents an assessment of a constructed wetland treatment performance with respect to a range of influential hydrologic and hydraulic factors. The assessment adopted an innovative approach, by partitioning the inflow runoff hydrograph and then investigating the treatment performance of each runoff segment within a constructed wetland. The hydrologic factors were obtained from a field monitoring program (see Sect. 2.22.2 in Chap. 2) while the relevant hydraulic factors in each segment of the hydrograph were generated by the conceptual model as discussed in Chap. 2. The new knowledge created will contribute to enhancing the design of constructed wetlands and thereby ensure more effective storm water treatment systems.

4.2 Selection of Hydrologic/Hydraulic Factors and Determination of Section Parameters

4.2.1 Selection of Hydrologic/Hydraulic Factors

Similar to the selection processes adopted for the bioretention basin, eleven rainfall events selected for the constructed wetland analysis were also less than one year ARI. Additionally, the eleven rainfall events accommodated the mid-range of the rainfall depth (3.0–44.6 mm) typical to the study area (Liu et al. 2012) and an appropriate number of storm water runoff samples were captured by the storm water monitoring stations installed at the inlet and outlet. The overall hydrologic and hydraulic characteristics of selected rainfall events are given in Table 4.1.

4.2.2 Determination of Section Parameters

In order to investigate the influence of hydraulic factors on wetland treatment as the rainfall event progresses, the inflow runoff hydrograph for each event was partitioned into 10 sectors, with each sector representing 10 % of the runoff volume.

Table 4.1 Selected rainfall events and hydrologic/hydraulic factors for constructed wetland analysis

Rainfall no.	Rainfall depth (mm)	Average retention time ^a (day)	Outflow peak ^a (L/s)	Average outflow discharge ^a (L/s)	Average depth of water ^a (m)
	RD	RT	OP	OQ	AD
W1	6.4	2.98	1.163	0.642	0.350
W2	18.4	2.56	2.319	1.197	0.465
W3	44.6	2.37	2.696	1.564	0.539
W4	6.8	3.97	1.071	0.302	0.250
W5	3.0	4.31	0.753	0.282	0.270
W6	25.8	2.48	2.477	1.255	0.452
W7	19.4	3.15	1.768	0.883	0.403
W8	4.8	4.24	0.969	0.398	0.283
W9	9.6	2.97	1.513	0.637	0.327
W10	20.2	1.92	2.536	1.358	0.497
W11	12.6	2.22	2.242	1.101	0.443

^agenerated from the wetland conceptual model

Based on this, pollutant load reduction was individually determined for every 10 % increment in runoff volume. The division of pollutant load reductions for the ten sectors of runoff volume was undertaken in the following steps and also illustrated in Fig. 4.1. Adopting a similar technique, the required hydraulic parameters were also generated by the use of the conceptual model so that the values corresponding to 10 % increment in runoff volume are available.

- Step I: The cumulative pollutant load (obtained from a number of monitored pollutant load data for inlet and outlet) versus cumulative inflow runoff volume was plotted as shown in Fig. 4.1.
- Step II: The cumulative pollutant load reduction for each sector of runoff volume was determined by the difference between cumulative pollutant loads at inlet and outlet for each 10 % sector in the plot.
- Step III: The pollutant load reduction for each 10 % sector was obtained by the difference between the cumulative pollutant load reductions of two consecutive 10 % sectors.

Accordingly, the resulting water quality section variables for each rainfall event included ten load reduction values for each pollutant species and section hydraulic parameters consisting of outflow average discharge (OQ), average water depth in the wetland (AD), average retention time (RT) and outflow peak (OP). The reasons for selecting the four hydraulic factors can be found in Sect. 2.4.3 of Chap. 2. Same as for the bioretention basin analysis, pollutant types considered were total nitrogen (TN), nitrate (NO₃⁻), nitrite (NO₂⁻), ammonium (NH₄⁺), total phosphorus (TP), phosphate (PO₄³⁻) and total suspended solids (TSS). Based on this, a total of 70

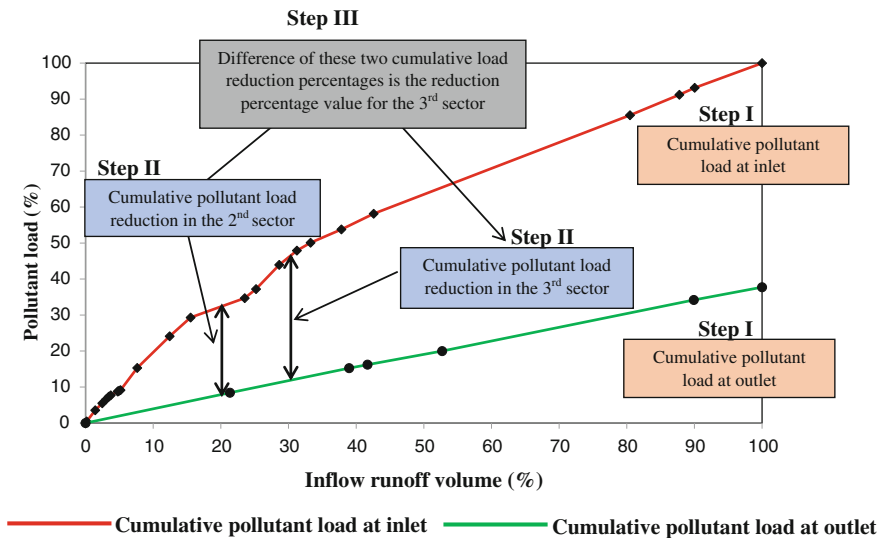


Fig. 4.1 Example of division of pollutant load reductions for the ten sectors of runoff volume. *Note* The cumulative pollutant load percentages at outlet were obtained by the total inflow pollutant loads dividing the outflow pollutant loads. Therefore, the cumulative pollutant load percentage at outlet does not reach 100 %

section pollutant load reduction values were generated for each rainfall event. The ten sectors of runoff volume for each event were represented as I, II, III, IV, V, VI, VII, VIII, IX and X.

4.3 Preliminary Investigation

The investigation was initially undertaken in order to have an overall understanding of the constructed wetland treatment performance. The PCA technique was used to undertake this analysis. A detailed explanation of PCA is presented in Appendix B. The data matrix used for PCA included 110 objects, which consisted of the 10 sectors for each rainfall event (10 sectors × 11 rainfall events), while variables were the seven pollutants (TN, NO₃⁻, NO₂⁻, NH₄⁺, TP, PO₄³⁻ and TSS) and four hydraulic factors (RT, OP, AD and OQ). The resulting PCA biplot is shown in Fig. 4.2.

From Fig. 4.2, it is noted that all pollutant load removal vectors correlate with each other and are projected on the positive PC2. The four hydraulic factors are divided into two groups. OP, AD and OQ vectors are projected on the positive PC1 where most large rainfall events such as W3 and W10 are located (see Table 4.1). RT vector is projected in the negative PC1 direction, where most small rainfall

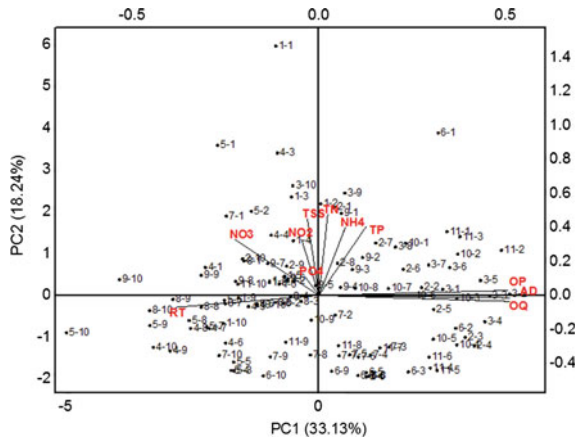


Fig. 4.2 PCA biplot for preliminary investigation of constructed wetland. The first digit is rainfall no. while the second digit represents the sector of runoff volume. For example, 5-6 represents the pollutant load reduction in the sixth 10 % sector of runoff volume in Rainfall No. 5; RT = retention time in each sector of runoff volume, OP = outflow peak in each sector of runoff volume, OQ = average outflow discharge in each sector of runoff volume and AD = average water depth in each sector of runoff volume

events such as W4 and W5 are located. This is due to the high runoff volumes generated during large rainfall events leading to elevated OP, OQ, and AD in wetland cells. However, this also results in the reduction in the RT as the storm water rapidly flows through the wetland system with a shorter retention time.

Since the pollutant species vectors are closely related to each other, the representative pollutants were selected for the following analysis. This was to avoid too many variables overshadowing the important relationships (Egodawatta et al. 2006). In this regard, TSS, TN and TP were selected for further analysis, since these three pollutants are the most common storm water pollutants in the urban environment (Goonetilleke et al. 2005).

4.4 Analysis of Different Rainfall Hydrograph Sectors

Factor analysis (FA) was initially performed for deriving a general understanding of the treatment performance of the constructed wetland from the beginning and towards the end of the runoff events. Factor analysis is a statistical method used to describe the variability among observed, correlated variables in terms of a potentially lower number of unobserved variables called factors. In factor analysis, the factors can be rotated to new axes that better separate the data. The number of factors is less than or equal to the number of original variables. Principal component extraction method with orthogonal VARIMAX rotation was adopted for the factor analysis. VARIMAX technique rotates the original factors such that the factors are

Table 4.2 Factor analysis

Sector of runoff volume	Factor 1	Factor 2
I	0.266	-0.911
II	0.314	-0.927
III	0.475	-0.859
IV	0.566	-0.798
V	0.678	-0.708
VI	0.752	-0.640
VII	0.841	-0.536
VIII	0.900	-0.434
IX	0.932	-0.345
X	0.948	-0.260

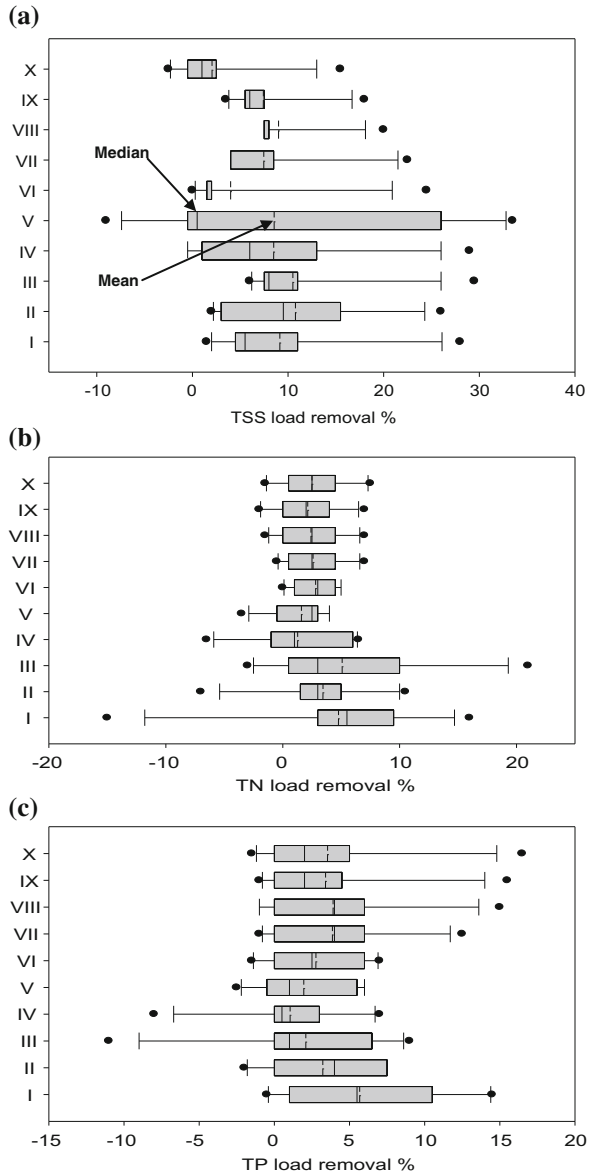
strongly correlated with a specific set of variables, while weakly correlated with the others (Abdi 2003). Detailed information in relation to factor analysis is provided in Appendix B. For this analysis, the variables included the load reduction values for the ten sectors of the inflow runoff hydrograph, while the objects were the three pollutant parameter values (TSS, TN and TP) for the eleven rainfall events. Accordingly, the data matrix was 33×10 . After careful investigation of the rotated component matrix, two underlying factors were found sufficient. These factors were extracted based on the initial eigenvalue criteria ≥ 1 . Table 4.2 shows the factor analysis results.

As shown in Table 4.2, the section parameters representing initial sectors of the inflow runoff hydrograph (I, II, III, IV and V) tend to correspond to Factor 2, while the later section parameters (VI, VII, VIII, IX and X) tend to relate to Factor 1. This implies that the treatment behaviour of the constructed wetland is different for the early and later sectors of the inflow runoff hydrograph. In other words, the treatment characteristics vary along with the runoff flow process. This highlights the need to understand the treatment characteristics of the constructed wetland based on different sectors of the inflow runoff hydrograph, rather than using lumped parameters.

4.5 Comparison of Treatment Characteristics for Different Sectors of the Inflow Runoff Hydrograph

The treatment characteristics of the constructed wetland during the runoff process are illustrated, using a boxplot as shown in Fig. 4.3. It is evident that although mean values of load reductions are not notably different among the ten sectors of the runoff hydrograph for the different pollutant species, the data ranges show differences in the early and later sectors. The first five sectors (the first 50 % of runoff volume) generally have relatively wider data ranges than the later sectors, particularly in the case of TSS and TN. However, the data ranges for TP load reduction are relatively similar throughout the whole runoff flow process.

Fig. 4.3 Comparison of pollutant load reductions in different sectors of runoff hydrograph **a** TSS load removal **b** TN load removal **c** TP load removal



Since the data was collected from eleven events with different rainfall and hydraulic characteristics, these observations imply that the performance of the constructed wetland for TSS and TN removal are highly variable with hydrologic and hydraulic characteristics in the initial sectors of the runoff hydrograph. TP load

reduction varies all the way through the runoff flow process. This means that the pollutant load reduction percentages (particularly for solids and nitrogen) for the initial flow could vary highly, based on the characteristics of each rainfall event such as ARI (rainfall frequency representing quantity) and antecedent dry days (representing pollutant load availability prior to rainfall). However, the corresponding percentages of the later flow would be relatively less variable although the characteristics of rainfall events producing runoff might be different. The relatively higher variability of TSS and TN load reductions in the initial sectors of the inflow runoff hydrograph is attributed to the mixing of incoming runoff with the stored water in the constructed wetland. Characteristics of the mixing that occur can be different for large and small events. For example, relatively larger rainfall events would lead to stronger disturbance when the runoff enters the wetland, while small runoff events would result in a relatively weaker mixing with the stored water.

In the case of TP, it could be attributed to the occurrence of both removal and release processes during the retention time. As noted by Lai and Lam (2009), phosphorus can be removed by adsorption while it can also re-enter the water column by desorption, depending on the physico-chemical properties of the soil and water in a constructed wetland. Therefore, TP load reductions could be variable within the runoff process.

Accordingly, it can be hypothesised that the hydraulic and hydrodynamic processes occurring in the wetland influence the treatment by the mixing of the water retained in the wetland with incoming storm water runoff. Additionally, the relatively higher variability of pollutant load reductions at the initial sectors of the runoff hydrograph (particularly for TSS and TN), caused by inflow mixing with the stored water, means that controlling and stabilising the inflow prior to it entering the constructed wetland would be a feasible approach to improve treatment performance. This is due to the fact that lower variability in inflow characteristics commonly leads to an improvement in storm water treatment.

4.6 Relationships Between Hydrologic/Hydraulic Factors and Treatment Performance

The treatment performance of the constructed wetland indicates different pollutant load reduction characteristics in different sectors of the inflow runoff hydrograph. In this context, it was important to further investigate how the treatment performance varies with hydrologic and hydraulic factors. This investigation was conducted using PROMETHEE and GAIA analysis due to its ability to identify relationships between criteria and actions (Liu et al. 2015). For details regarding the PROMETHEE method, refer to Sect. 3.2 in Chap. 3. The criteria used for this analysis were TSS, TN and TP load reduction values, and OP, OQ, AD and RT for

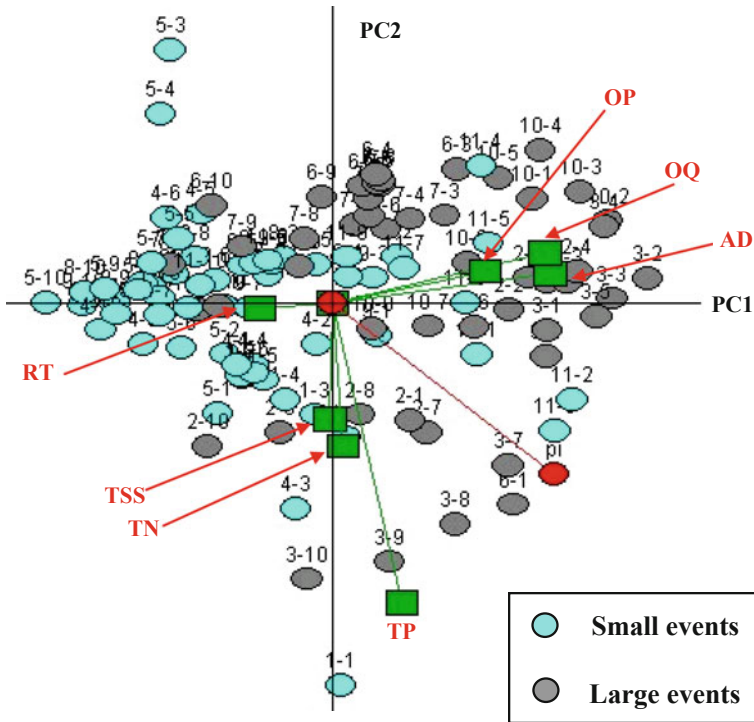


Fig. 4.4 GAIA biplots for constructed wetland analysis ($\Delta = 75.36\%$)

each sector of the runoff hydrograph, while the actions were the ten sectors of the runoff hydrograph for the eleven rainfall events. Accordingly, a matrix (110×7) was submitted to PROMETHEE analysis to form the GAIA biplot for all rainfall events. The resulting GAIA biplot is given in Fig. 4.4.

In terms of Fig. 4.4, all the actions generally form two clusters primarily influenced by the rainfall depth. Most of the rainfall events clustering on the positive PC1 axis are relatively larger rainfall events, where their rainfall depths are larger than 15 mm, such as Event 3 and Event 10 (W3 and W10 in Table 4.1). Additionally, OP, OQ and AD vectors are also projected on the positive PC1 axis. However, most of the rainfall events positioning on the negative PC1 axis are relatively small events such as Event 4 and Event 5, and their rainfall depths are less than 15 mm (W4 and W5 in Table 4.1). Furthermore, these small rainfall events are closely related to RT. This means that larger rainfall events lead to higher outflow peak, outflow discharge and water depth in the wetland, thereby suggesting greater displacement of the water stored in the wetland and higher outflow velocities, while longer retention time tends to occur during small rainfall events.

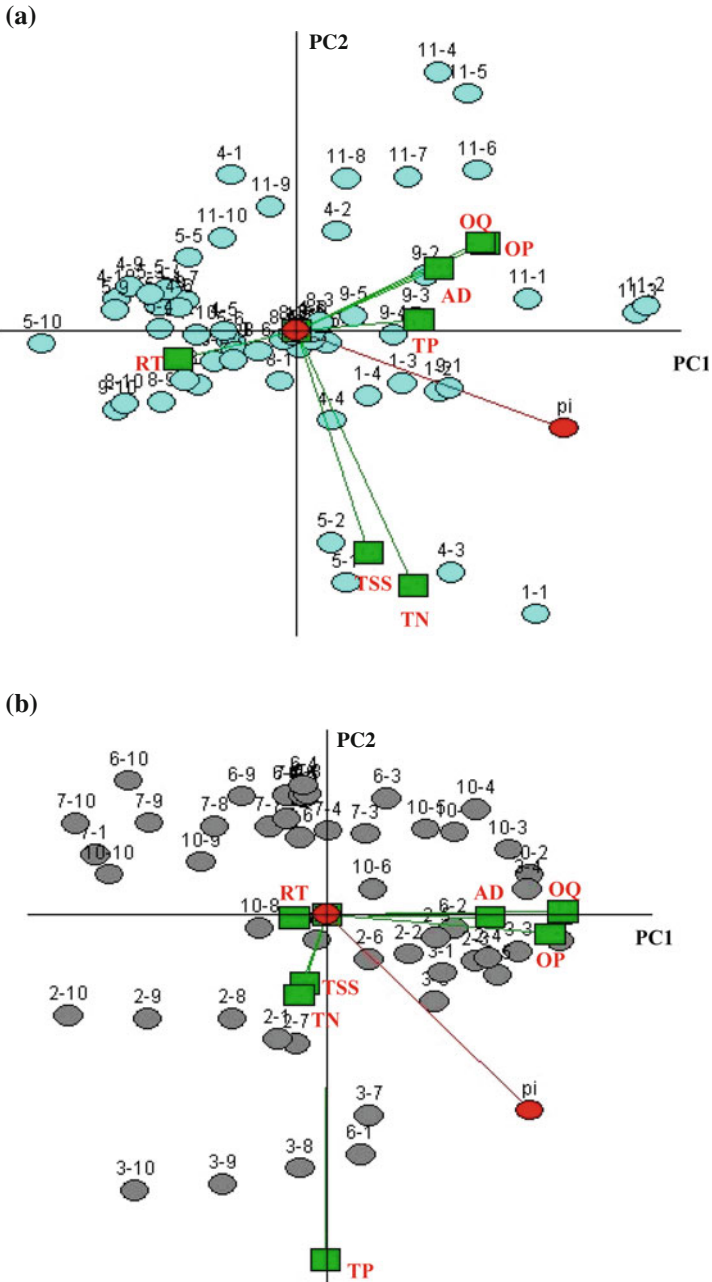


Fig. 4.5 GAIA biplots for small and large events analysis **a** GAIA biplot for small event data ($\Delta = 66.69\%$) **b** GAIA biplot for large event data ($\Delta = 86.64\%$)

As evident in Fig. 4.4, the actions scattered in the direction of TSS, TN and TP load reduction vectors primarily belong to the initial sectors of the runoff hydrographs for small rainfall events such as load reductions in the first 10 % of the runoff hydrograph in Event 1 (1-1) and load reductions in the third 10 % of the runoff hydrograph in Event 4 (4-3) and the end sectors of large rainfall events such as load reductions in the ninth and tenth 10 % of the runoff hydrograph in Event 3 (3-9 and 3-10). This is an indication of different treatment characteristics for large and small events, which require separate analysis to understand. For this purpose, two matrices for small (<15 mm, matrix 60×7) and large (>15 mm, matrix 50×7) rainfall events as identified above were created and the resulting GAIA biplots are given in Fig. 4.5a, b. According to Fig. 4.5a (small rainfall events), it is evident that actions located close to pollutant load reduction vectors are primarily the initial sectors of the runoff hydrograph (such as load reductions in the first and second 10 % of the runoff hydrograph in Event 5 (5-1 and 5-2). In terms of Fig. 4.5b (large rainfall events), actions located close to pollutant load reduction vectors are primarily the later sectors of the runoff hydrograph such as load reductions in the seventh, eighth, ninth and tenth 10 % of the runoff hydrograph in Event 2 (2-7, 2-8, 2-9 and 2-10).

These results can be also supported by the original data. Figure 4.6 shows the mean values of pollutant load reductions in each sector of the runoff hydrograph for small and large events. As evident in Fig. 4.6, in the initial sectors of the runoff hydrograph, small rainfall events generally have relatively higher pollutant load reductions compared to large rainfall events, while the opposite holds true for the later sectors of the runoff hydrograph.

These outcomes suggest that the treatment performance of a constructed wetland for small rainfall events and large rainfall events differs. In the case of small rainfall events, the relatively cleaner, treated storm water, which was already stored in wetland cells, flows out in the early stage of a runoff event. Later runoff from small rainfall events would mix with water already stored in the wetland, leading to the gradual increase in pollutant concentrations in the outflow. However, for large rainfall events, the trends in pollutant load reductions are generally lower at the beginning and gradually increase towards the end of a rainfall event. This is attributed to the rapid mixing of inflow runoff with the stored water in the wetland at the beginning, which typically carries high loads of pollutants termed as first flush (Li et al. 2007, 2010). However, with gradual decrease in velocity and the supply of particulate pollutants, treatment performance increases during the latter part of runoff events. This is attributed to the increased settling of particulate pollutants in the wetland cells. These analysis outcomes highlight the importance of ensuring that the inflow into a constructed wetland is not turbulent in order to achieve consistent treatment performance for both small and large rainfall events.

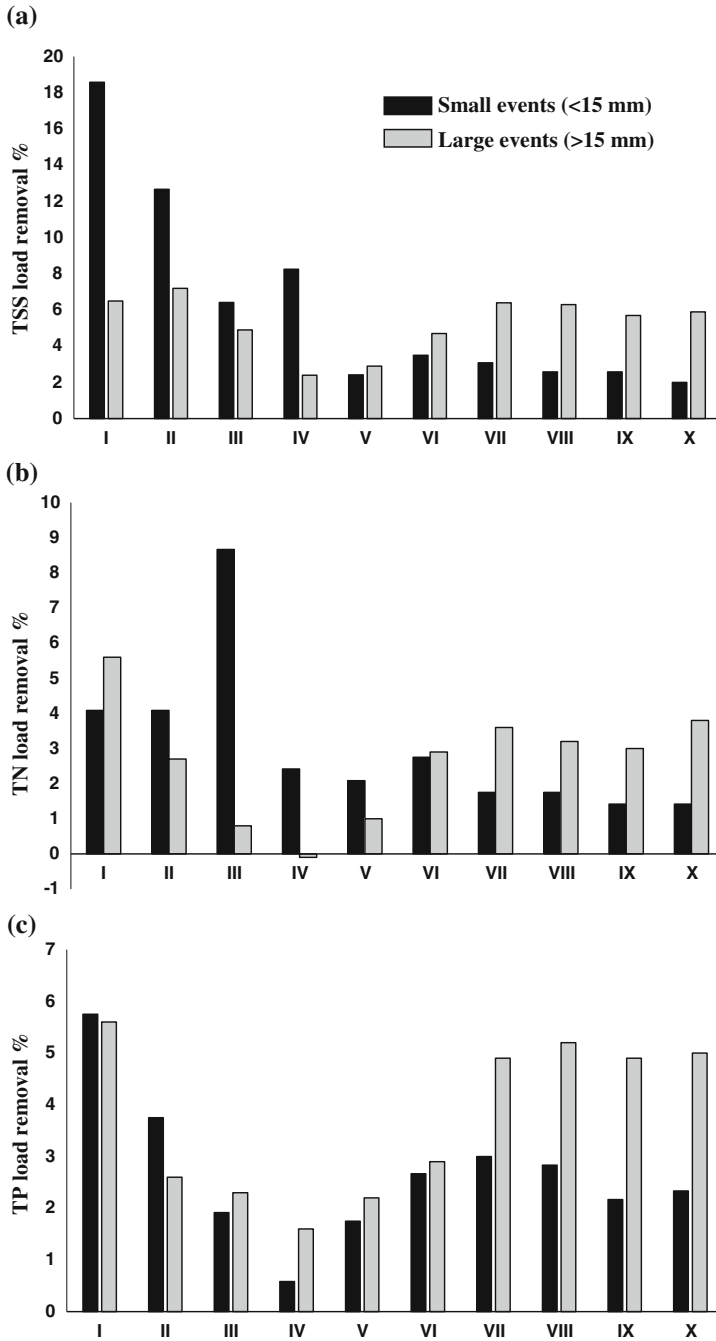


Fig. 4.6 Comparison of pollutant load reductions for small and large rainfall events a TSS b TN c TP

4.7 Conclusions

This chapter discussed the treatment performance of a constructed wetland and its relationship with hydrologic/hydraulic factors. It is noted that large and small rainfall events are differently treated in a constructed wetland. The pollutant load reductions for the initial sector of runoff from large rainfall events are relatively low, due to the rapid mixing. This means that it is critical to control the inflow to reduce turbulence before runoff enters a constructed wetland, particularly for the large events. Accordingly, it may be necessary to establish an inlet pond prior to the flow entering the constructed wetland so that the inflow will initially stabilise. This is further supported by the occurrence of the first flush phenomenon where the initial sector of runoff generally carries higher pollutant loads. Therefore, enhancing the treatment of the initial sector of runoff could significantly contribute to the improvement of the overall treatment efficiency of a wetland. Additionally, the provision of a bypass system is recommended to control the runoff to the constructed wetland. This will protect the constructed wetland from erosion damage resulting from high runoff rates.

References

- Abdi H (2003) Factor rotations. SAGE, Thousand Oaks
- Alias N, Liu A, Egodawatta P, Goonetilleke A (2014a) Sectional analysis of the pollutant wash-off process based on runoff hydrograph. *J Environ Manage* 134:63–69
- Alias N, Liu A, Goonetilleke A, Egodawatta P (2014b) Time as the critical factor in the investigation of the relationship between pollutant wash-off and rainfall characteristics. *Ecol Eng* 64:301–305
- Egodawatta P, Goonetilleke A, Ayoko GA, Thomas EC (2006) Understanding the interrelationships between stormwater quality and rainfall and runoff factors in residential catchments. In: 7th international conference on urban drainage modelling and the 4th international conference on water sensitive urban design, Melbourne, Australia
- Goonetilleke A, Thomas E, Ginn S, Gilbert D (2005) Understanding the role of land use in urban stormwater quality management. *J Environ Manage* 74:31–42
- Lai DYF, Lam KC (2009) Phosphorus sorption by sediments in a subtropical constructed wetland receiving stormwater runoff. *Ecol Eng* 35(5):735–743
- Li LQ, Yin CQ, He QC, Kong LL (2007) First flush of storm runoff pollution from an urban catchment in China. *J Environ Sci* 19:295–299
- Liu WC, Huang WZ, Yang AY (2010) Characterization of suspended solids and heavy metal distributions during first flush in highway runoff. *J Environ Sci Eng* 4(9):44–50
- Liu A, Goonetilleke A, Egodawatta P (2012) Taxonomy for rainfall events based on pollutant wash-off potential in urban areas. *Ecol Eng* 47:110–114
- Liu A, Egodawatta P, Goonetilleke A (2015) Role of rainfall and catchment characteristics on urban stormwater quality. Springer
- Mangangka IR, Liu A, Egodawatta P, Goonetilleke A (2014) Sectional analysis of stormwater treatment performance of a constructed wetland. *Ecol Eng* 77:172–179

Lampiran 3: Surat Tugas



KEMENTERIAN RISET, TEKNOLOGI DAN PENDIDIKAN TINGGI
UNIVERSITAS SAM RATULANGI
LEMBAGA PENELITIAN DAN PENGABDIAN KEPADA MASYARAKAT

Alamat : Kampus UNSRAT Manado
Telp. (0431) 827560, Fax. (0431) 827560

Email: lppm@unsrat.ac.id Laman: <http://lppm.unsrat.ac.id>

SURAT TUGAS

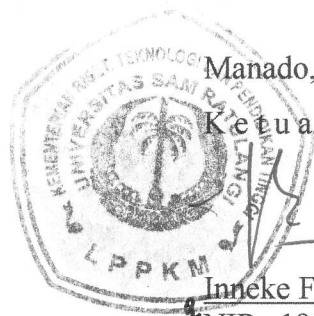
Nomor: 522/UN12.13/LT/2016

Ketua Lembaga Penelitian Dan Pengabdian Kepada Masyarakat Universitas Sam Ratulangi Manado, dengan ini menugaskan kepada:

1. Nama : Ir. Isri Ronald Mangangka, MEng, PhD (Ketua)
NIP : 19650924 199303 1 003
Pangkat Gol. : Penata Tingkat I/III d
Jabatan : Lektor Kepala
2. Nama : Ir. Hansye Jeki Tawas, MAgr (Anggota)
NIP : 19581208 199512 1 001
Pangkat Gol. : Penata/III c
Jabatan : Lektor

untuk melaksanakan penelitian skim PUPT , yang di danai oleh dana DRPM Kemenristekdikti tahun 2016 dengan judul ***“Penerapan Konsep “Water Sensitive Urban Design” Sebagai Sistem Drainase Berwawasan Lingkungan Di Kota Manado”***.

Demikian surat tugas ini dibuat untuk digunakan sebagaimana mestinya.



Manado, 22 April 2016

Ketua,

Inneke F.M. Rumengan

NIP : 195711051984032001 &

PENDIDIKAN TINGGI
SEKRETARIAT /DIREKTORAT /
INSPEKTORAT JENDERAL
DIREKTORAT JENDERAL
PENDIDIKAN TINGGI

Lembar ke :
Kode Nomor :
Nomor : 522/UN12.13/LT/2016

SURAT PERINTAH PERJALANAN DINAS

1.	Pejabat berwenang yang memberi perintah	KETUA LEMBAGA PENELITIAN DAN PENGABDIAN KEPADA MASYARAKAT UNIVERSITAS SAM RATULANGI
2.	Nama Pegawai yang diperintah N I P	Ir. Isri Ronald Mangangka,MEng,PhD 19650924 199303 1 003
3.	a. Pangkat dan Golongan menurut PP No. 6 tahun 1997 b. Jabatan c. Gaji Pokok d. Tingkat menurut Peraturan Perjalanan Dinas	a. Penata Tingkat I/IIId b. Lektor Kepala c. d.
4.	Maksud Perjalanan Dinas	Untuk melaksanakan penelitian skim Fundamental, yang didanai oleh dana DRPM Kemenristekdikti tahun 2016 dengan judul " <i>Penerapan Konsep "Water Sensitive Urban Design" Sebagai Sistem Drainase Berwawasan Lingkungan Di Kota Manado</i> ".
5.	Alat angkut yang diperlukan	
6.	a. Tempat Berangkat b. Tempat Tujuan	a. b.
7.	a. Lama perjalanan dinas b. Tanggal berangkat c. Tanggal harus kembali	a. b. c.
8.	Pengikut : Nama : Umur : Ir. Hansye Jeki Tawas,MAgr	Hubungan Keluarga / Keterangan Anggota Tim
9.	Pembebanan anggaran : a. Instansi b. Mata anggaran	a. Dibebankan pada anggaran yang tersedia b.
10.	Keterangan Lain	




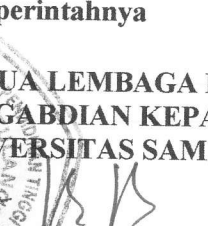
Dikeluarkan di : Manado
Pada tanggal : 22 April 2016

Ketua Lembaga Penelitian dan Pengabdian
Kepada Masyarakat UNSRAT,



Inneke F.M. Rumengan
NIP.195711051984032001

Name : Ika Juliantina
 ID Number : 196007011987102001
 Job Position : Vice Dean For Administrations
 and Finance Affairs

I		Berangkat dari : Manado (tempat kedudukan) Pada tanggal : Ke : KETUA LEMBAGA PENELITIAN DAN PENGABDIAN KEPADAMASYARAKAT UNIVERSITAS SAMRATULANGI,  Inneke F.M. Rumengan NIP : 195711051984032001 &
II	Tiba Pada tanggal : Kepala 	Berangkat dari : Pada tanggal : Kepala 
III	Tiba : Pada tanggal : Kepala :	Berangkat dari : Pada tanggal : Kepala :
IV	Tiba : Pada tanggal : Kepala :	Berangkat dari : Pada tanggal : Kepala :
V	Tiba : Pada tanggal : Kepala :	Berangkat dari : Pada tanggal : Kepala :
VI	Tiba : Pada tanggal : Kepala :	Telah diperiksa, dengan keterangan bahwa perjalanan tersebut di atas benar dilakukan atas perintahnya  KETUA LEMBAGA PENELITIAN DAN PENGABDIAN KEPADA MASYARAKAT UNIVERSITAS SAM RATULANGI, Inneke F. M. Rumengan NIP : 19571105 198403 2001 &

PERHATIAN :

Pejabat yang berwenang menerbitkan SPPD, pegawai yang melakukan perjalanan dinas, para pejabat yang mengesahkan tanggal berangkat / tiba serta bendaharawan bertanggung jawab berdasarkan peraturan-peraturan keuangan Negara apabila Negara menderita kerugian akibat kesalahan, kelalaian dan kealpaan, angka 8 lampiran surat edaran Menteri keuangan tanggal 3 April 1979, No. S.247/MK.03/1979.