



KEMENTERIAN RISET, TEKNOLOGI DAN PENDIDIKAN TINGGI
UNIVERSITAS SAM RATULANGI
FAKULTAS TEKNIK
UPT - PERPUSTAKAAN

Jln. Kampus Unsrat Bahu, Manado 95115
Telp. (0431) 852959 ; Fax. (0431) 823705; e-Mail:fatek 02@ mdo.mega net.id

SURAT KETERANGAN

Nomor: 01 /PFT/2017

Yang bertanda tangan di bawah ini, Kepala UPT-Perpustakaan Fakultas Teknik Universitas Sam Ratulangi, menerangkan bahwa:

Nama : **Ir. Isri Ronald Mangangka, M.Eng., Ph.D.**
NIP : 19650924 199303 1 003
Pangkat / Golongan ruang : Pembina / IV/a
Jabatan : Lektor Kepala
Jurusan /Program Studi : Teknik Sipil /S1 Teknik Lingkungan

Telah menyerahkan Laporan Penelitian, sbb:

Laporan Akhir Penelitian Produk Terapan (PPT) – November 2017, berjudul Pemanfaatan Material Lokal untuk Rigid Porous Pavement sebagai Komponen Eko Drainase.

untuk disimpan dan digunakan sebagai bahan bacaan pada UPT-Perpustakaan Fakultas Teknik Unsrat. Demikian surat keterangan ini untuk dipergunakan sebagaimana mestinya.

Manado, 16 Januari 2017

a.n. Kepala UPT-Perpustakaan
Fakultas Teknik Unsrat,

Servie O. Dapas, ST., MT.

NIP. 19671003 199303 1 001

Fakultas : Teknik

**LAPORAN AKHIR
PENELITIAN PRODUK TERAPAN**



**PEMANFAATAN MATERIAL LOKAL UNTUK “RIGID POROUS PAVEMENT”
SEBAGAI KOMPONEN EKO-DRAINASE**

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

**Ir. Oscar Hans Kaseke, MT.
NIDN : 0012105302**

**Ir. Mecky R. E. Manoppo, MT.
NIDN : 0013056404**

UNIVERSITAS SAM RATULANGI

NOVEMBER 2017

Dibiayai Dari Daftar Isian Pelaksanaan Anggaran (DIPA)
Nomor: SP DIPA - 042.01.2.400959/2017 tanggal 21 April 2017

HALAMAN PENGESAHAN

Produk Terapan (PT)

Judul

Pemanfaatan Material Lokal Untuk "Rigid Porous Pavement" Sebagai Komponen Eko-Drainase

Peneliti/Pelaksana

Nama Lengkap : ISRI R. MANGANGKA
Perguruan Tinggi : Universitas Sam Ratulangi
NIP/NIK : 196509241993031003
NIDN : 0024096505
Jabatan / Golongan : Lektor Kepala - III/d
Fakultas / Program Studi : Fakultas Teknik - Teknik Lingkungan
Nomor HP : 081242865495
Alamat surel(e-mail) : isri.mangangka@unsrat.ac.id
Tahun Pelaksanaan : Tahun ke 1 dari rencana 1 Tahun
Biaya Yang Diusulkan : Rp. 60,000,000
Biaya Maksimum : Rp. 60,000,000

Anggota

Anggota (1)

Nama : OSCAR HANS KASEKE
NIDN : 0012105302
Perguruan Tinggi : Universitas Sam Ratulangi

Anggota (2)

Nama : MECKY R.E. MANOPPO
NIDN : 0013056404
Perguruan Tinggi : Universitas Sam Ratulangi



Mengetahui
Dekan Fakultas Teknik,

(Prof. Dr. Ir. Jeffrey I. Kindangen, DEA)
NIP/NIK : 196506031990031003

Manado, 25 November 2017
Ketua,

(IR. ISRI R. MANGANGKA, M.ENG.,PH.D)
NIP/NIK : 196509241993031003



Menyetujui,
Ketua LPPM UNSRAT

(Prof. Dr. Ir. Ineke F.M. Rumengan, M.Sc)
NIP/NIK : 195711051984032001

RINGKASAN

Penerapan sistem drainase yang berwawasan lingkungan (eko-drainase) dirasakan sebagai salah satu upaya untuk mengurangi menurunnya kualitas lingkungan termasuk kualitas dan kuantitas air hujan. Dengan prinsip eko-drainase, penanganan air hujan tidak hanya difokuskan pada penanganan kuantitasnya saja tetapi lebih terintegrasi pada manajemen kuantitas dan kualitas dengan tambahan tujuan/sasaran yaitu keramahan (amenity), pemandangan dan estetika, konservasi air dan restorasi ekologi.

Konsep eko-drainase diimplementasikan melalui tiga metoda yaitu sistem detensi, sistem retensi dan sistem infiltrasi. Penggunaan “porous pavement” pada konstruksi jalan dengan beban rendah merupakan salah satu cara pelaksanaan sistem infiltrasi. Porous pavement sebagai alternatif dari pavement kedap yang konvensional memiliki banyak keuntungan dari sisi manajemen air hujan. Permukaan porous pavement menyebabkan air berinfiltrasi dan perkolasi ke dalam lapis pondasi jalan dan selanjutnya ke tanah dasar. Keuntungan pemanfaatan porous pavement ini antara lain untuk mengurangi debit puncak, meningkatkan pengisian ulang air tanah dan meningkatkan kualitas air permukaan (runoff).

Untuk meningkatkan daya dukung konstruksi porous pavement maka ukuran dan kuantitas pori harus dikurangi, di pihak lain untuk meningkatkan kapasitas infiltrasi maka ukuran dan kuantitas pori harus diperbesar. Penelitian ini bertujuan untuk menghasilkan komposisi agregat pada campuran beton untuk konstruksi rigid porous pavement dengan kekuatan yang memadai namun memiliki kapasitas infiltrasi yang cukup. Komposisi agregat yang optimal ini diperoleh melalui percobaan di laboratorium terhadap beberapa komposisi desain campuran beton. Sampel-sampel dibuat menurut berbagai jenis komposisi agregat, kemudian diuji kekuatan konstruksi (daya dukung) dari masing-masing sampel serta kapasitas infiltrasi yang dimilikinya. Sampel yang komposisi agregatnya terbaik yaitu sample yang memiliki kekuatan konstruksi yang memadai untuk mendukung beban kendaraan namun juga memiliki kapasitas infiltrasi yang cukup.

Disamping mendapatkan kombinasi yang optimal antara kekuatan konstruksi rigid porous pavement ini dan kapasitas infiltrasinya, penelitian ini juga bertujuan mengetahui hubungan antara kombinasi ini dengan sifat-sifat agregat (aggregate properties) lokal yang digunakan. Hubungan ini diperoleh melalui analisa statistik yaitu analisa multivariabel (multivariate analysis).

Hasil analisa statistik menunjukkan adanya hubungan antara kekuatan konstruksi dan sifat-sifat agregat lokal yang digunakan. Dari dua jenis agregat berdasarkan sumber pengambilan depositnya, yaitu agregat yang berasal dari Kinilow dan agregat yang berasal dari Lansot, hasil pengamatan dan pengujian menunjukkan adanya kesamaan dalam hal trend hubungan antara daya dukung konstruksi dan laju infiltrasi. Namun demikian, hasil penelitian juga menunjukkan adanya perbedaan kekuatan konstruksi dan kapasitas infiltrasi serta korelasinya terhadap sifat-sifat agregat. Hasil penelitian juga menunjukkan bahwa agregat lokal baik yang berasal dari Kinilow maupun yang berasal dari Lansot sangat layak untuk digunakan sebagai bahan baku pembuatan Porous Rigid Pavement. Hasil penelitian menunjukkan bahwa sampel-sampel dengan ukuran minimum agregat 2,36 mm (No. 8) masih memiliki kapasitas infiltrasi yang lebih dari cukup untuk menyerap air hujan berintensitas tinggi dengan durasi 5 menit dari hujan rancangan dengan perioda ulang 10 tahun dan 20 tahun. Disisi lain, sampel-sampel dengan ukuran minimum agregat 9,525 mm (3/8 inch) yang memiliki kapasitas infiltrasi yang sangat besar ternyata masih memiliki daya dukung yang cukup untuk dijadikan lapis permukaan jalan (pavement).

Kata kunci: rigid porous pavement, porous pavement, eko-drainase

PRAKATA

Patutlah kita panjatkan puji syukur ke Hadirat Tuhan Yang Maha Esa yang telah melimpahkan rahmat dan petunjuk-Nya sehingga Penelitian Produk Terapan (PPT) yang dibiayai oleh Dana PNBP Unsrat ini dapat diselesaikan. Dengan selesainya penelitian ini maka berarti telah ada hasil penelitian berupa luaran-luaran sebagaimana yang dijanjikan dan tertuang dalam proposal penelitian yang telah dibuat sebelumnya.

Kami berterima kasih kepada Ibu Rektor dan Ketua LPPM yang telah memberikan kesempatan bagi kami untuk menerima bantuan dana penelitian untuk membiayai penelitian ini. Terima kasih juga kami sampaikan kepada Dekan Fakultas Teknik Unsrat, serta pihak-pihak lain yang telah membantu dan memfasilitasi sehingga penelitian ini dapat terselenggara.

Kami menyadari bahwa hasil penelitian ini belum sepenuhnya menjawab kebutuhan akan pengetahuan tentang Rigid Porous Pavement atau porous concrete pavement, dan hanya dapat menjawab sebagian kecil dari perilaku-perilaku rigid porous pavement berdasarkan beberapa parameternya saja. Untuk itu penelitian lanjutan yang difokuskan pada variable-variabel lain dari rigid porous pavement sangat terbuka dan dibutuhkan untuk dapat memperoleh pengetahuan dan pemahaman tentang konstruksi ini dari sudut pandang yang berbeda-beda. Semakin banyak variable-variabel lain yang diteliti akan menghasilkan pemahaman yang lebih konkrit dan komprehensif terhadap konstruksi ini.

Manado, 4 Desember 2017

Tim Peneliti

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 Perkerasan Berpori (<i>Porous Pavement</i>)	4
2.2 Perkerasan Kaku (<i>Rigid Pavement</i>)	5
2.3 Analisa Curah Hujan	7
2.3.1 Uji Data Hujan Outlier	7
2.3.2 Analisis Curah Hujan Rancangan	7
2.4 Model Infiltrasi.....	10
BAB 3. TUJUAN DAN MANFAAT PENELITIAN	13
3.1 Tujuan Penelitian	13
3.2 Manfaat/Urgensi Penelitian.....	13
3.3 Hasil yang Ditargetkan dan Penerapannya untuk Menunjang Pembangunan dan Penerapan Iptek-sosbud.	13
BAB 4. METODE PENELITIAN	15
4.1 Lokasi Penelitian	15
4.2 Peta Jalan (Road Map)	15
4.3 Tahapan Penelitian	17
4.4 Luaran	18
BAB 5. HASIL DAN LUARAN YANG DICAPAI	19
5.1 Analisa Hidrologi	19
5.2 Uji Data Hujan Outlier	19

5.3 Analisis Curah Hujan Rancangan	21
5.4 Perhitungan Intensitas Curah Hujan.....	25
5.5 Memperhitungkan Pengaruh Clogging	27
5.6 Hasil Pemeriksaan Laboratorium Terhadap Sifat-sifat Agregat	27
5.7 Desain Campuran Beton	29
5.8 Hasil Pengujian Permeabilitas dan Kuat Tekan	31
5.10 Interpretasi Hasil Pengujian Infiltrasi dan Kuat Tekan.....	32
5.11 Hubungan antara Permeability dan Ukuran minimum Agregat	33
BAB 6. KESIMPULAN DAN SARAN	36
6.1 Kesimpulan	36
6.2 Saran.....	36
DAFTAR PUSTAKA	38

DAFTAR TABEL

Tabel 1. Curah Hujan Harian Maksimum Stasiun Kaleosan	19
Tabel 2. Perhitungan Outlier Data Hujan Stasiun Kaleosan.....	20
Tabel 3. Perhitungan Curah Hujan Rancangan Dengan Menggunakan Distribusi Gumbel Tipe I.....	22
Tabel 4. Perhitungan Curah Hujan Rancangan Dengan Menggunakan Distribusi Log Normal Dua Parameter	23
Tabel 5. Curah Hujan Rancangan Dengan Distribusi Log Pearson Tipe III	24
Tabel 6. Rekapitulasi Curah Hujan Rancangan Tiap Metode.....	24
Tabel 7. Hasil Perhitungan Intensitas Curah Hujan.....	26
Tabel 8: Aggregate Properties	28
Tabel 9: Komposisi Agregat, Semen PC dan Air	29
Tabel 10: Hasil Pengujian Infiltrasi dan Kuat Tekan Sampel.....	31
Tabel 11: Ukuran Minimum Agregat yang Dapat Digunakan.....	34

DAFTAR GAMBAR

Gambar 1: Perkerasan Berpori (Porous Pavement)	5
Gambar 2: Variabel-variabel dari Model Infiltrasi Green-Ampt.....	12
Gambar 3: Peta Jalan (Road Map) Penelitian	16
Gambar 4: Skema Tahapan Pelaksanaan Penelitian	17
Gambar 5: Curah Hujan Rancangan Tiap Model	24
Gambar 6: Kurva Intensitas-Frequency-Duration (IFD)	26
Gambar 5: PCA Byplot dari Aggregate Properties.....	28
Gambar 6: Gradasi Agregat	30
Gambar 7: Sampel-sampel Porous Pavement Beton	30
Gambar 8: Hubungan Antara Permeability dan Kuat Tekan Beton 28 Hari	32
Gambar 9: Hubungan Antara Permeability dan Ukuran Minimum Agregat.....	33

DAFTAR LAMPIRAN

Surat Pernyataan Tanggung Jawab Belanja.....	41
Foto-foto Kegiatan Penelitian.....	42
Bukti Fisik Luaran Penelitian.....	45
Surat Tugas Penelitian.....	46
Data Luaran Tahun 2017.....	47

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 dkk. 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 dkk. 2004a; Wong dkk. 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 dkk. 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 dan Thomas 2003).

Penerapan sistem drainase yang berwawasan lingkungan (eko-drainase) 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).

Lebih jauh dari sistem eko-drainase, di Australia dikenal dengan Water Sensitive Urban Desain (WSUD), sedangkan di Amerika dikenal dengan Sustainable Urban Drainage System (SUDS), yaitu konsep penanganan air hujan (stormwater management) yang tidak hanya fokus pada sistem drainase tapi penanganan air hujan secara komprehensif dan menyeluruh dengan memperhatikan dan tetap menjaga kualitas lingkungan. Berbagai penelitian detail telah dilakukan terhadap unjuk kerja komponen-komponen WSUD/SUDS sebagai komponen struktur eko-drainase dalam menangani kuantitas dan kualitas air hujan, diantaranya studi terhadap unjuk kerja rawa buatan (*constructed wetland*) (Mangangka, dkk. 2013) dan studi terhadap unjuk kerja *bioretention basin* (Mangangka, dkk. 2015).

“Porous Pavement” (Perkerasan Berpori), adalah juga salah satu komponen yang digunakan pada sistem eko-drainase. Porous pavement adalah komponen eko-drainase yang terintegrasi yang bermanfaat tidak hanya menangani kuantitas dan kualitas air hujan, tapi juga menciptakan keramahan, estetika dan keindahan, konservasi air dan restorasi ekologi. Porous pavement adalah lapisan perkerasan jalan tidak kedap air yang memungkinkan air hujan untuk berinfiltrasi dan perkolasi ke dalam lapisan tanah dasar.

1.2 Rumusan Masalah

Sulawesi Utara adalah salah satu provinsi di Indonesia yang terletak di sebelah utara garis khatulistiwa tepatnya terletak antara 00°15' – 05°34' Lintang Utara dan 123°07' – 127°10' Bujur Timur, berbatasan dengan Laut Sulawesi, Philipina dan Samudera Pasifik di sebelah utara serta Laut Maluku di sebelah timur, sedangkan batas sebelah selatan dan barat masing-masing adalah Teluk Tomini dan Provinsi Gorontalo (BPS Sulut 2015). Provinsi ini terdiri dari 11 Kabupaten dan 4 Kota yang pertumbuhannya sangat pesat.

Kota 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”.

Tak hanya di Kota Manado, kota-kota lain yaitu Kota Tomohon, Kota Bitung dan Kota Kotamobagu juga mengalami pertumbuhan dan perkembangan yang sangat pesat, baik perkembangan jumlah penduduk, tingkat ekonomi, serta kawasan pembangunan, baik kawasan pemukiman, industri maupun kawasan bisnis/ ekonomi. Pertumbuhan perkembangan juga sangat terasa di konsentrasi-konsentrasi pemukiman, terutama di ibu kota-ibu kota kabupaten yang terus bertambah jumlahnya setelah adanya pemekaran. Semuanya itu menyebabkan semakin berkurangnya lahan terbuka hijau dan daerah resapan hujan akibat bertambahnya luas kawasan yang kedap air untuk kepentingan pemukiman, industri dan bisnis, yang pada akhirnya bermuara pada berkurangnya daya dukung lingkungan serta menurunnya kualitas lingkungan hidup.

Sistem drainase yang merupakan salah satu fasilitas infrastruktur perkotaan juga perlu mendapat perhatian. Sistem drainase yang berwawasan lingkungan (eko-drainase) sebagai alternative dari sistem drainase konvensional perlu diterapkan. Porous pavement sebagai komponen eko-drainase telah dimanfaatkan dan dibangun dalam jumlah yang besar di negara-negara maju seperti Amerika Serikat dan Australia dimana disana telah memiliki pedoman produksi dan pembuatan konstruksi ini berdasarkan hasil-hasil kajian yang mereka lakukan sesuai dengan kondisi wilayah mereka. Meskipun porous pavement telah berhasil dikembangkan di banyak kota di dunia, namun ketersediaan bahan baku agregat lokal serta kondisi sifat-sifat curah hujan yang jauh berbeda dengan kondisi di Indonesia menyebabkan pedoman produksi dan pelaksanaan pembuatan konstruksi ini harus ditinjau kembali sebelum diimplementasikan di Indonesia.

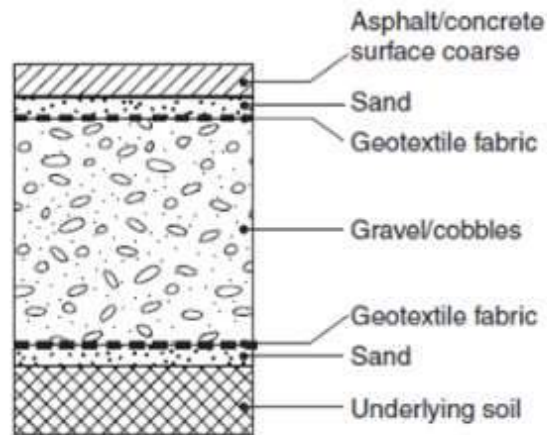
BAB 2. TINJAUAN PUSTAKA

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).

Sistem eko-drainase adalah salah satu metoda penanganan air hujan yang terintegrasi dan berkelanjutan, diciptakan sebagai alternatif dari sistem drainase perkotaan konvensional. Sistem eko-drainase memiliki pendekatan filosofi untuk model dan perencanaan perkotaan yang bertujuan untuk meminimalkan dampak hidrologi dari pembangunan perkotaan terhadap lingkungan sekitar (Lloyd dkk. 2002). Porous pavement (perkerasan berpori) adalah salah satu komponen sistem eko-drainase yang digunakan untuk menangani air hujan baik dari segi kuantitas maupun kualitas. Porous pavement mendukung proses penjernihan polutan melalui proses filtrasi pada saat air hujan melewati pori-porinya, serta mengurangi volume limpasan air hujan yang berarti dapat mengurangi resiko banjir dan meningkatkan pengisian ulang air tanah (groundwater recharge).

2.1 Perkerasan Berpori (*Porous Pavement*)

Drainase yang berwawasan lingkungan (eko-drainase) dapat digolongkan dalam tiga sistem yaitu sistem detensi (detention system), sistem retensi (retention system), dan sistem infiltrasi (infiltration system). Perkerasan berpori adalah salah satu bentuk dari sistem infiltrasi (infiltration system). Perkerasan berpori adalah merupakan lapisan penutup jalan yang tidak kedap air karena konstruksi lapisan penutup ini memiliki pori-pori sehingga air yang tertahan di atas lapisan penutup ini akan terinfiltrasi lewat pori-pori tersebut. Perkerasan berpori adalah perkerasan yang dibuat dengan proporsi agregat halus yang dibatasi. Perkerasan berpori memiliki pori-pori yang relatif besar tersebar secara merata pada bagian-bagiannya. Pori-pori ini memungkinkan air untuk mengalir sehingga membuat perkerasan berpori memiliki sifat dapat tembus air (Gambar 1).



Gambar 1: Perkerasan Berpori (Porous Pavement)

Perkerasan berpori bisa berupa perkerasan lentur (*flexible pavement*) atau perkerasan kaku (*rigid pavement*). Perkerasan lentur merupakan konstruksi lapis perkerasan dibuat menggunakan bahan aspal sebagai pengikat, sedangkan perkerasan kaku menggunakan bahan semen (beton). Dengan demikian perkerasan berpori yang menggunakan aspal disebut *flexible porous pavement* sedangkan yang menggunakan bahan beton disebut *rigid porous pavement*.

Perkerasan berpori dapat menghilangkan sedimen, nutrient dan logam berat serta hidrokarbon dari dari runoff yang terkontaminasi melalui proses yang dinamakan adsorpsi. Adsorpsi adalah proses penyerapan suatu zat ke permukaan material/zat lain. Dalam proses ini, zat yang diserap menempel di permukaan zat penyerap. Berbagai studi lapangan menunjukkan bahwa perkerasan berpori sangat efektif menahan logam-logam terlarut (Dierkes dkk. 2002 pada Department of Water and Swan River Trust 2007).

2.2 Perkerasan Kaku (*Rigid Pavement*)

Untuk dapat memberikan rasa nyaman, permukaan jalan diberi lapisan perkerasan. Menurut Asiyanto (2010), berdasarkan bahan pengikatnya perkerasan jalan dapat dibedakan atas Perkerasan Lentur (*Flexible Pavement*), Perkerasan Kaku (*Rigid Pavement*) dan Perkerasan Komposit (*Composite Pavement*). Perkerasan lentur merupakan perkerasan yang menggunakan aspal sebagai bahan pengikat. Lapisan-lapisan perkerasannya bersifat memikul dan menyebarkan beban lalu lintas ke tanah dasar. Struktur jalan untuk jenis perkerasan lentur pada dasarnya terdiri dari tanah dasar (*subgrade*), lapis pondasi bawah (*subbase course*), lapis pondasi atas (*base course*), dan lapis permukaan (*surface course*). Perkerasan kaku adalah

lapisan beton, dimana lapisan tersebut berfungsi sebagai *base course* sekaligus sebagai *surface course*. Perkerasan kaku menggunakan semen (*Portland Cement*) sebagai bahan pengikatnya. Pelat beton dengan atau tanpa tulangan diletakkan diatas tanah dasar dengan atau tanpa lapisan pondasi bawah. Beban lalu lintas sebagian besar dipikul oleh pelat beton. Perkerasan kaku terdiri dari 3 lapisan yaitu, tanah dasar (*subgrade*), lapis pondasi bawah (*subbase course*), pelat beton (*concrete slab*). Perkerasan komposit merupakan gabungan dari perkerasan kaku (*rigid pavement*) dan lapisan perkerasan lemtur (*flexible pavement*) di atasnya, dimana kedua jenis perkerasan ini bekerja sama dalam memikul beban lalu lintas. Untuk ini maka perlu ada persyaratan ketebalan perkerasan aspal agar mempunyai kekuatan yang cukup serta mencegah retak refleksi dari perkerasan beton di bawahnya.

Pada konstruksi perkerasan kaku, struktur utama perkerasan adalah lapisan pelat beton, karenanya perkerasan ini juga disebut perkerasan beton. Perkerasan kaku dilaksanakan pada kondisi daya dukung tanah dasar yang kurang baik, atau beban lalu lintas yang harus dilayani relatif besar. Saodang (2005) membagi perkerasan kaku (perkerasan beton) menjadi 5 jenis yaitu:

a. Perkerasan Beton Bersambung Tanpa Tulangan

Tipe ini tidak menggunakan sistem penulangan besi, kecuali pada bagian-bagian konstruksi tertentu seperti misalnya pada bagian sambungan memanjang atau melintang. Keuntungan tipe perkerasan ini dibanding tipe lainnya antara lain cukup sederhana pelaksanaannya karena tidak menggunakan penulangan.

b. Perkerasan Beton Bersambung dengan Tulangan

Tipe ini menggunakan sistem penulangan maka panjang ruas antar sambungan melintang biasanya lebih panjang berkisar antara 10 meter sampai 15 meter.

c. Perkerasan Beton Menerus dengan Tulangan

Tipe ini mempunyai sistem penulangan yang menerus sepanjang perkerasan. Dengan demikian sistem sambungan melintang tidak dibutuhkan untuk tipe ini. Fungsi dan pada penulangan ini adalah untuk mengurangi terjadinya keretakan-keretakan akibat penyusutan (*shrinkage cracking*).

d. Perkerasan Beton Pratekan

Sistem penulangan pada tipe pratekan ini meliputi arah melintang dan memanjang. Resiko terjadinya retakan yang mungkin terjadi dengan sistem pratekan dapat dikurangi.

e. Perkerasan Beton Bertulang Fiber

Tipe ini menggunakan Fiber sebagai pengganti tulangan bajanya. Bentuknya seperti perkerasan beton bersambung tanpa tulangan, tapi pada saat mencampur agregat dan semennya, turut ditambahkan bahan fiber.

2.3 Analisa Curah Hujan

Lingkup pekerjaan analisa hidrologi meliputi analisa data outlier, analisa hujan rancangan dan analisa intensitas curah hujan. Hasil akhir dari analisa hidrologi ini adalah besaran tinggi curah hujan rancangan dengan berbagai periode ulang, sebagai masukan untuk menentukan besarnya infiltrasi yang mungkin terjadi.

2.3.1 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 (CS_{Log}):

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

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

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

Uji outlier tinggi:

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

Uji outlier rendah:

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

2.3.2 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

S_n = Reduksi standard deviasi

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

n = Jumlah data

2. Distribusi Log Normal 2 Parameter

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

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

Dimana,

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

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

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

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

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

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

σ = deviasi standar populasi Ln X atau log X

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

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

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

Cs = koefisien kemencengan

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

C_k = koefisien kurtosis

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

2.4 Model Infiltrasi

Penelitian ini akan mempertimbangkan kondisi optimum antara kekuatan konstruksi dan kapasitas infiltrasi dari rigid porous pavement yang didesain. Dalam menganalisis laju infiltrasinya, berbagai model infiltrasi tersedia untuk dipilih. Pada prakteknya, model infiltrasi yang sesuai dapat dipilih setelah dilakukan pengujian lapangan dan melakukan kalibrasi model dengan hasil uji lapangan tersebut. Pemilihan model infiltrasi didasarkan pada model infiltrasi yang paling mendekati kondisi hasil uji lapangan.

Banyak metoda telah dibuat untuk memodelkan proses infiltrasi baik menggunakan pendekatan secara fisik maupun pendekatan empiris. Dari semua model yang ada, Metoda Kostiakov dan Philip adalah dua metoda yang paling banyak digunakan karena kesederhanaanya dan mudahnya menghitung parameter-parameternya (Mbagwu, 1995). Meskipun demikian, penelitian-penelitian terbaru menunjukkan bahwa Metoda Philip adalah yang paling populer (Vandervaere 1997; Minasny dan McBarney 2000; Zang 1997 dan Angulo-Jaramillo dkk. 2000).

Kostiakov pada tahun 1932, sebagai ganti laju infiltrasi yang konstan, menyarankan sebuah formula yang mengasumsikan bahwa pada saat waktu $t = 0$, laju infiltrasi besarnya tak hingga dan pada saat waktu $t = \infty$, laju infiltrasi mendekati nol (Marino dan Luthin 1982).

$$F(t) = a t^b \quad (1)$$

dimana:

$F(t)$ = infiltrasi kumulatif setelah waktu t [L]

a, b = koefisien waktu dan eksponen dari Kostiakov's

t = elapsed time after ponding [T]

Persamaan Kostiakov di atas telah dimodifikasi untuk memasukkan laju infiltrasi minimum tertentu (Marino dan Luthin 1982).

$$F(t) = c t + a t^b \quad (2)$$

dimana c adalah laju infiltrasi pada $t = \infty$, dan laju infiltrasi $f(t)$ pada saat waktu t dapat diformulasikan:

$$f(t) = c + ab t^{b-1} \quad (3)$$

Philip (1957) mengemukakan sebuah formula yang menunjukkan hubungan antara infiltrasi kumulatif dan waktu yang terdiri dari dua suku. Suku pertama pada sisi kanan menyatakan efek dari daya hisap tanah dan suku kedua menyatakan pengaruh gravitasi.

$$I(t) = S t^{1/2} + A t \quad (4)$$

dimana:

$I(t)$ = infiltrasi kumulatif setelah waktu t [L]

t = waktu [T]

S = sorptivity, parameter potensi daya hisap tanah [$LT^{1/2}$].

A = konstanta yang menyatakan laju transmisi air tanah [LT^{-1}].

Formula Philip di atas adalah untuk infiltrasi satu dimensi. Untuk memasukkan komponen aliran horizontal yang disebabkan oleh gaya kapilar untuk infiltrasi tiga dimensi dari sebuah disk infiltrometer, formula tersebut telah dimodifikasi menjadi (Vandervaere 1997):

$$I_{3D} = S t^{1/2} + (A+B) t \quad (5)$$

where:

I_{3D} = kumulatif infiltrasi tiga dimensi [L]

B = konstanta yang berhubungan dengan gerakan horizontal air sebagaimana didefinisikan oleh Haverkamp dkk. (1994):

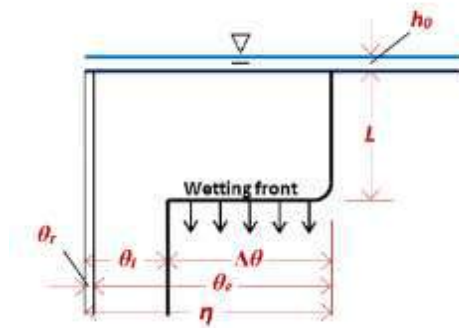
$$B = \frac{\gamma \cdot S^2}{r_0(\theta_0 - \theta_n)} \quad (6)$$

Dimana θ_n dan θ_0 adalah harga awal dan akhir volume kandungan air, r_0 adalah diameter disk dan γ adalah konstanta tak berdimensi yang harganya sebesar 0.75. Dengan mensubstitusi persamaan 6, persamaan 5 dapat ditulis:

$$I_{3D} = S t^{1/2} + A t + \frac{\gamma \cdot S^2}{r_0(\theta_0 - \theta_n)} t \quad (7)$$

Persamaan 7 terdiri dari tiga suku pada sisi kanannya; suku pertama berhubungan dengan aliran kapilar vertical dan mendominasi proses infiltrasi pada tahap awal. Suku kedua menunjukkan aliran vertical yang disebabkan oleh gaya gravitasi, dan yang ketiga berhubungan dengan komponen aliran kapilar lateral. Semua parameter ini dapat diperoleh melalui eksperimen yang menggunakan infiltrometer disk atau infiltrometer ring.

Sebuah formula yang lain dikemukakan oleh Green dan Ampt (1911). Prinsip dari model Green-Ampt ini didasarkan pada kontinuitas dan momentum (Chow dkk. 1988). Konseptual format dari persamaan Green-Ampt disajikan pada Gambar 2.



Gambar 2: Variabel-variabel dari Model Infiltrasi Green-Ampt

Teori alternative ini didasarkan lebih pada teori fisik yang mengasumsikan adanya “wetting front” yang membagi tanah dengan kandungan air (moisture content) θ_0 dibawah wetting front dan tanah jenuh air dengan kandungan air θ_i diatas wetting front. Wetting front telah masuk hingga kedalaman L , sehingga kedalaman infiltrasi dapat diformulasikan sebagai:

$$F(t) = L (\theta_i - \theta_0) \quad (4)$$

dimana:

L = Kedalaman wetting front (zona basah) [L]

θ_0 = kandungan air awal

θ_i = kandungan air akhir

BAB 3. TUJUAN DAN MANFAAT PENELITIAN

3.1 Tujuan Penelitian

Penelitian ini bertujuan untuk melakukan studi/ kajian pemanfaatan material lokal untuk digunakan pada konstruksi jalan rigid porous pavement disesuaikan dengan karaktersistik curah hujan dan iklim di wilayah Sulawesi Utara yang mempengaruhi kapasitas infiltrasi yang dibutuhkan oleh konstruksi tersebut agar konstruksi tersebut ekonomis dan memiliki unjuk kerja yang optimal.

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 yang berwawasan lingkungan dan berkelanjutan dapat membuahkan hasil pembangunan dengan resiko kerusakan lingkungan sekecil mungkin. Karena itu penelitian ini difokuskan untuk menghasilkan rujukan desain infrastruktur yang mempertahankan kualitas lingkungan hidup. Hasil penelitian ini diharapkan dapat dimanfaatkan secara nyata oleh perencana dan pelaksana dalam mengaplikasikan konstruksi rigid porous pavement yang ramah lingkungan sebagai komponen eko-drainase.

3.3 Hasil yang Ditargetkan dan Penerapannya untuk Menunjang Pembangunan dan Penerapan Iptek-sosbud.

Penelitian ini diharapkan dapat membuahkan hasil nyata berupa desain konstruksi perkerasan jalan rigid porous pavement dengan menggunakan material lokal yang disesuaikan dengan kebutuhan kapasitas infiltrasi untuk mengakomodir karakteristik curah hujan dan iklim di Sulawesi Utara. Desain ini kiranya dapat dijadikan acuan bagi perencana dan pelaksana konstruksi jalan. Penelitian ini merupakan studi kasus untuk wilayah Sulawesi Utara, khususnya daerah Manado-Minahasa-Bitung serta dapat juga dijadikan model untuk diterapkan di berbagai kota di Indonesia yang secara spesifik beriklim tropis. Luaran yang akan

dihasilkan, tidak hanya berupa produk desain, tetapi juga aspek ilmiah yang dituangkan dalam artikel ilmiah yang akan diterbitkan pada jurnal ilmiah nasional dan karya ilmiah untuk dipresentasikan pada seminar ilmiah nasional atau internasional.

BAB 4. METODE PENELITIAN

4.1 Lokasi Penelitian

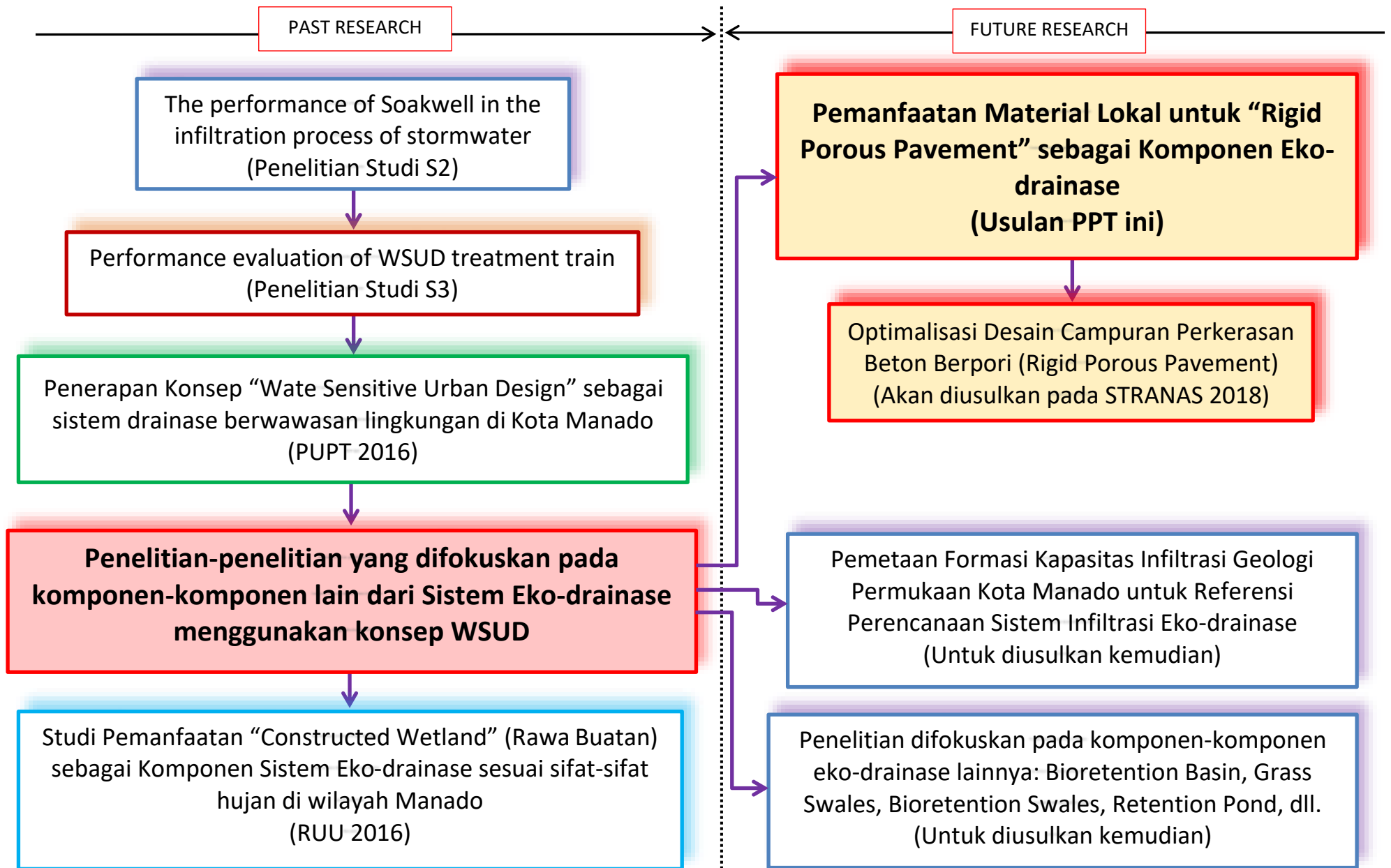
Lokasi penelitian adalah di wilayah Manado-Minahasa Bitung yaitu lokasi-lokasi galian C sebagai sumber material lokal yang akan digunakan. Wilayah Manado dan sekitarnya dipilih menjadi lokasi penelitian ini juga dengan alasan ketersediaan data-data curah hujan yang lebih lengkap. Penelitian selanjutnya akan dilaksanakan di Laboratorium Perkerasan Jalan Fakultas Teknik Unsrat dimana akan dilaksanakan pengujian-pengujian.

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 studi S3 di Queensland University of Technology. Penelitian ini bersifat terapan, mengaplikasikan konsep yang sudah diteliti selama masa studi S3 ke dalam bentuk desain yang konkrit, untuk menghasilkan produk teknologi berupa desain komponen sistem Eko-drainase. Penelitian ini meskipun direncanakan hanya berlangsung selama setahun, namun terintegrasi dengan penelitian-penelitian lain yang sudah dilaksanakan dan yang akan diusulkan sebagaimana digambarkan pada peta jalan (road map) penelitian.

Selain lanjutan dari penelitian semasa studi S2 dan S3, penelitian ini sangat berhubungan dengan usulan penelitian PUPT yang telah dilaksanakan tahun 2016. Penelitian PUPT 2016 tersebut berjudul “Penerapan Konsep ‘Wate Sensitive Urban Design (WSUD)’ sebagai sistem drainase berwawasan lingkungan di Kota Manado, dimana penelitian tersebut merupakan tinjauan Sistem Eko-drainase menggunakan konsep WSUD secara global keseluruhan. Penelitian-penelitian lanjutan setelah penelitian PUPT tersebut termasuk penelitian ini merupakan penelitian-penelitian dengan konsentrasi pada salah satu komponen WSUD.

Salat satu komponen WSUD yang akan dipilih untuk menjadi fokus pada penelitian lanjutan adalah soakwell/sumur resapan. Komponen ini dipilih karena komponen ini pernah diteliti aspek hidrolisnya selama masa studi S2 di Curtin University, Austrlia. Alasan lain dipilihnya komponen ini 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 Gambar 3.

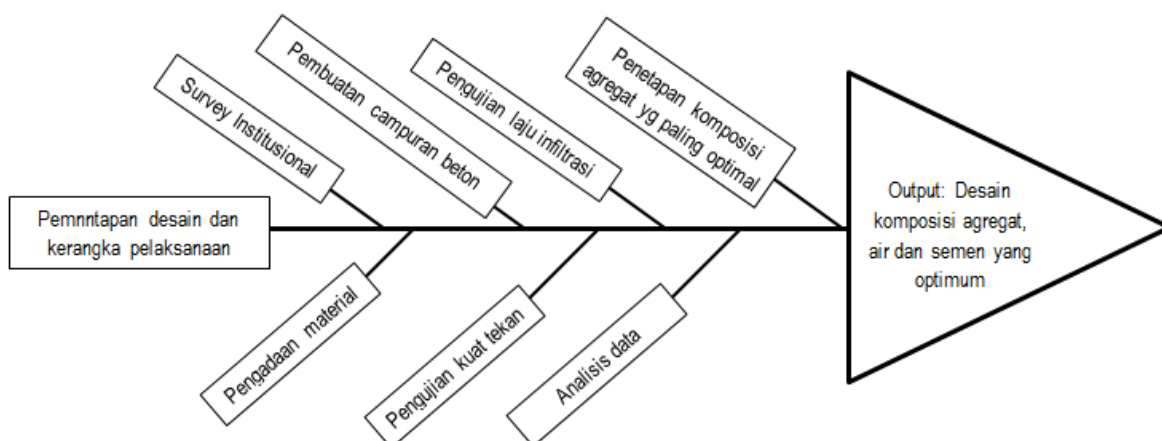


Gambar 3: Peta Jalan (Road Map) Penelitian

4.3 Tahapan Penelitian

Penelitian yang diusulkan ini direncanakan akan diselesaikan dalam durasi selama 6 (enam) bulan dan akan dilaksanakan menurut tahap-tahap penelitian yang disusun secara berurutan sebagai berikut:

- 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 memperoleh data-data sekunder, di antaranya adalah data curah hujan dari Kantor BMKG Manado dan Balai Wilayah Sungai Sulawesi I.
- 3) Pengadaan material agregat kasar dan agregat halus dari beberapa lokasi galian C di wilayah Manado-Minahasa-Bitung, dan pengadaan semen PC sebagai bahan pengikat.
- 4) Pembuatan campuran beton porous pavement dengan berbagai komposisi agregat dan bahan pengikat (semen PC) di laboratorium.
- 5) Melakukan pengujian kuat tekan di laboratorium terhadap beton berpori yang dibuat.
- 6) Melakukan pengujian laju infiltrasi dengan menggunakan ring infiltrometer terhadap beton yang dibuat.
- 7) Melakukan analisis terhadap hasil pengujian kuat tekan dan hasil pengujian laju infiltrasi.
- 8) Menetapkan komposisi campuran agregat yang paling optimal dan ekonomis berdasarkan hasil analisa terhadap kuat tekan dan laju infiltrasi.



Gambar 4: Skema Tahapan Pelaksanaan Penelitian

4.4 Luaran

Output/luaran yang diharapkan akan dihasilkan dalam penelitian ini adalah sebagai berikut:

- (1) Hasil desain komposisi agregat, air dan semen PC yang menghasilkan konstruksi perkerasan kaku berpori (rigid porous pavement) yang optimal dan ekonomis.
- (2) Karya ilmiah yang dipresentasikan pada pertemuan ilmiah internasional atau nasional

BAB 5. HASIL DAN LUARAN YANG DICAPAI

5.1 Analisa Hidrologi

Analisa hidrologi dimulai dengan menganalisa data curah hujan. Data yang di kumpulkan ini diperoleh dari buku curah hujan dan klimatologi dari Unit Hidrologi, Kantor Balai Wilayah Sungai Sulawesi I. Data curah hujan harian maksimum Kota Manado selama 10 tahun terakhir pengamatan (tahun 2007 s/d 2016) diperlihatkan pada Tabel 1.

Tabel 1. Curah Hujan Harian Maksimum Stasiun Kaleosan

No.	Tahun	X	Rangking X
		(mm)	(mm)
1	2007	38.30	38.30
2	2008	74.00	50.30
3	2009	108.00	57.00
4	2010	70.00	70.00
5	2011	50.30	74.00
6	2012	76.10	76.10
7	2013	57.00	80.60
8	2014	90.20	90.20
9	2015	80.60	108.00
10	2016	170.00	170.00

Sumber: Bagian Hidrologi, Balai Wilayah Sungai Sulawesi I

5.2 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_{SLog}):

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

Perhitungan data outlier selanjutnya dilakukan dengan menggunakan Tabel 2.

Dari Tabel 2 diketahui

$$X_i \text{ min} = 38.30$$

$$X_i \text{ max} = 170.00$$

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

$$S_{Log} = 0.1793$$

Tabel 2. Perhitungan Outlier Data Hujan Stasiun Kaleosan

No.	Tahun	Xi (mm)	Log Xi	(log Xi - log X)	(log Xi - log X) ²	(log Xi - log X) ³
1	2007	38.30	1.5832	-0.2930	0.0858	-0.0251
2	2011	74.00	1.8692	-0.0069	0.0000	0.0000
3	2013	108.00	2.0334	0.1572	0.0247	0.0039
4	2010	70.00	1.8451	-0.0311	0.0010	0.0000
5	2008	50.30	1.7016	-0.1746	0.0305	-0.0053
6	2012	76.10	1.8814	0.0052	0.0000	0.0000
7	2015	57.00	1.7559	-0.1203	0.0145	-0.0017
8	2014	90.20	1.9552	0.0790	0.0062	0.0005
9	2009	80.60	1.9063	0.0302	0.0009	0.0000
10	2016	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			

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

$$CS_{Log} = 0.4009$$

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

Uji outlier tinggi:

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

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

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

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

Uji outlier rendah:

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

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

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

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

5.3 Analisis Curah Hujan Rancangan

Tujuan dari analisis frekuensi curah hujan ini adalah untuk memperoleh curah hujan rancangan untuk beberapa periode 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 $n=10$, $S_n = 0.9496$

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

n = Jumlah data

Hasil perhitungan distribusi Gumbel tipe 1 diberikan pada Tabel 3 berikut ini.

Tabel 3. 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 variasi (cv) dengan periode ulang t. Nilai k dapat diperoleh dan tabel yang merupakari 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 4. 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

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

C_s = koefisien kepeccengan

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

C_k = koefisien kurtosis

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

Tabel 5. 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

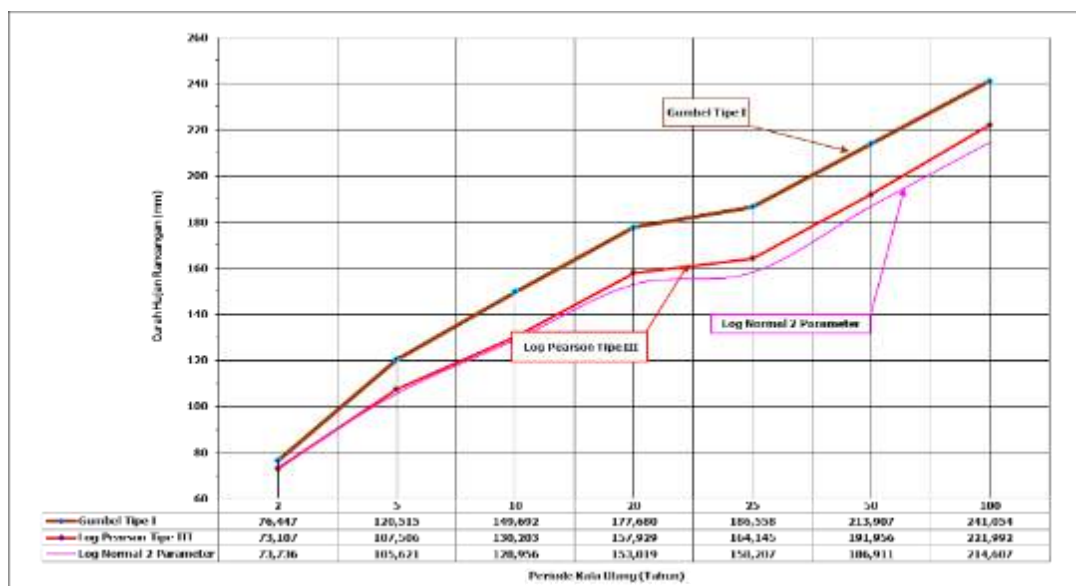
4. Rekapitulasi Curah Hujan Rancangan Untuk Tiap Jenis Distribusi

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 6. 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 5: Curah Hujan Rancangan Tiap Model

5.4 Perhitungan Intensitas Curah Hujan

Intensitas hujan adalah tinggi hujan atau volume hujan per satuan waktu. Perhitungan intensitas curah hujan di wilayah studi dilakukan dengan menggunakan rumus Mononobe. Besar intensitas curah hujan sangat tergantung pada besarnya waktu konsentrasi (t_c) dari aliran limpasan permukaan di wilayah tersebut. Waktu konsentrasi hujan adalah waktu yang diperlukan untuk mengalirnya air dari titik terjauh menuju suatu titik tertentu yang ditinjau pada daerah pengaliran. Perhitungan intensitas hujan dengan menggunakan rumus Mononobe tersebut adalah seperti berikut ini.

$$I = \frac{R_{24}}{24} \cdot \left(\frac{24}{t_c}\right)^{2/3}$$

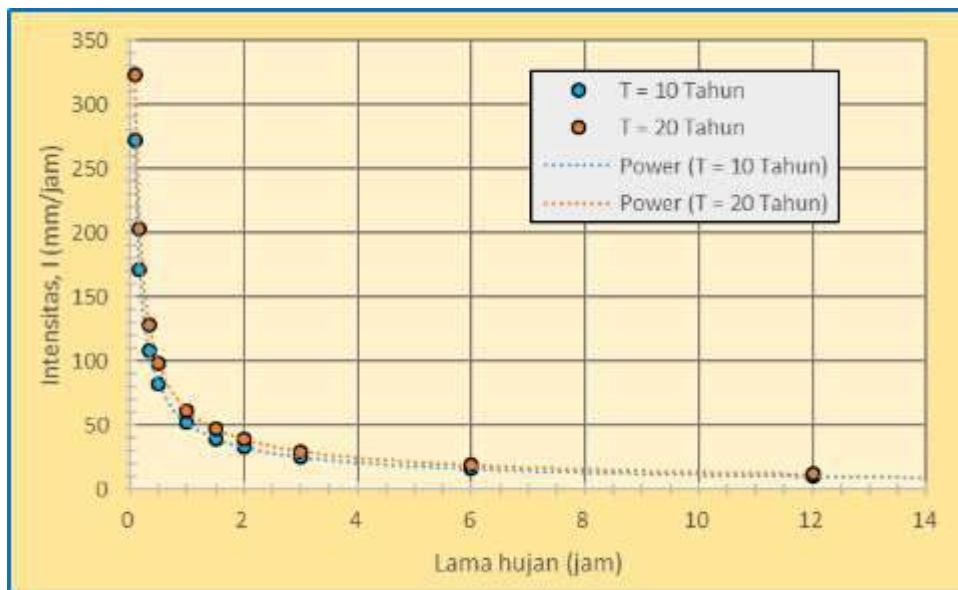
Dimana I adalah intensitas hujan dalam mm/jam, t_c adalah waktu konsentrasi dalam jam dan R_{24} adalah curah hujan harian rancangan dalam mm. Debit banjir terbesar dihasilkan dari curah hujan dengan lamanya hujan t sama dengan waktu konsentrasi t_c .

Besarnya curah hujan harian rancangan yang akan digunakan dalam perencanaan tergantung pada perioda ulang perencanaan, sedangkan penetapan perioda ulang didasarkan dan tergantung pada tingkat resiko dan biaya konstruksi. Pengambilan perioda ulang yang lebih singkat akan memperkecil biaya konstruksi dari bangunan drainase atau air hujan yang direncanakan, konsekuensinya resiko kerugian dan kerusakan yang akan ditimbulkan akan menjadi lebih besar. Sebaliknya pengambilan perioda ulang yang lebih lama akan membuat anggaran biaya membengkak tapi resiko kerugian yang ditimbulkan akan menjadi lebih kecil. Untuk kawasan rural atau pedesaan, perioda ulang perencanaan biasanya diambil sekitar 1 hingga 5 tahun. Sedangkan untuk kawasan perkotaan, guna memperkecil resiko kerugian prasarana dan infrastruktur yang mahal biasanya digunakan perioda ulang 10 tahun, bahkan untuk kawasan bisnis/ komersial yang padat biasanya diambil hingga 20 tahun. Dalam perencanaan ini dimana lokasi perencanaan adalah lapangan parkir yang bisa saja terletak di kawasan bisnis yang padat, maka perioda ulang perencanaan diambil 10 dan 20 tahun. Dengan demikian, menurut Tabel 6, curah hujan harian rancangan untuk perioda ulang 10 tahun adalah 149.69 mm dan untuk perioda ulang 20 tahun adalah sebesar 177.68 mm.

Dengan demikian, dengan menggunakan rumus mononobe diatas, hubungan antara intensitas curah hujan dan lamanya hujan baik untuk hujan dengan kala ulang 10 tahun maupun 20 tahun tertuang dalam Tabel 7 dan dapat digambarkan dalam bentuk Kurva Intensity-Frequency-Duration (IFD) menurut Gambar 6 berikut ini.

Tabel 7. Hasil Perhitungan Intensitas Curah Hujan

Lamanya Hujan, t (menit)	Lamanya Hujan, t (Jam)	Intensitas, I (mm/jam)	
		T = 10 Tahun	T = 20 Tahun
5	0,083	272	323
10	0,167	171	203
20	0,333	108	128
30	0,5	82	98
60	1,0	52	62
90	1,5	40	47
120	2	33	39
180	3	25	30
360	6	16	19
720	12	10	12



Gambar 6: Kurva Intensitas-Frequency-Duration (IFD)

Seperti terlihat di atas, intensitas curah hujan untuk hujan rancangan dengan periode ulang 10 tahun adalah sebesar 272 mm/jam, sedangkan untuk hujan rancangan dengan periode ulang 20 tahun adalah sebesar 323 mm/jam. Sebagaimana telah diuraikan sebelumnya, maka desain konstruksi rigid porous pavement ini harus direncanakan untuk hujan rancangan dengan

periode ulang 20 tahun, mengingat bahwa konstruksi ini bisa digunakan untuk kawasan bisnis/komersial yang padat.

Skope dari perencanaan ini adalah drive way dan lapangan parkir, dimana luas catchnya relative kecil. Untuk luas catchment yang kecil, maka intensitas hujan maksimum terbesar biasanya direncanakan berdasarkan curah hujan berdurasi pendek, dalam hal ini 5 menit. Dari Tabel 6 terlihat bahwa besarnya intensitas hujan berdurasi 5 menit untuk curah hujan dengan kala ulang 20 tahun adalah sebesar 323 mm/jam.

5.5 Memperhitungkan Pengaruh Clogging

Unjuk kerja dari porous pavement bisa menurun seiring waktu. Hal ini disebabkan karena terjadinya clogging, akibat tersumbatnya pori-pori dengan material tanah yang terbawa aliran permukaan (runoff) (Browne 2011, Coughlin 2011 dan Boogaard 2014). Karena itu, perencanaan porous pavement harus memperhitungkan pengaruh clogging ini. Andrés-Valeri dkk (2016) mengatakan bahwa dalam hal mengatasi masalah clogging, Rigid porous pavement atau Porous concrete pavement memiliki performance lebih baik dibanding Flexible Porous Pavement atau Porous Asphalt Pavement sehubungan dengan kapasitas infiltrasi. Rigid porous pavement memiliki potensi lebih kecil untuk clogging dan dengan mudah dibersihkan secara alami oleh aliran air hujan. Namun demikian, Lucke (2012) setelah melakukan studi terhadap kapasitas infiltrasi permeable pavement yang telah berumur 8 tahun mengatakan bahwa laju infiltrasi porous pavement berkurang seiring waktu dan penurunan kapasitas infiltrasi ini adalah sebesar 63.3% hingga 100%.

Sebagai kompensasi terhadap kemungkinan terjadinya clogging dimasa datang, maka intensitas hujan rencana yang akan diterima oleh konstruksi porous pavement dalam penelitian ini diasumsikan sebesar 2 kali, atau menjadi sebesar **646 mm/jam** untuk hujan dengan kala ulang 20 tahun dan **544 mm/jam** untuk hujan dengan kala ulang 10 tahun. Nilai ini akan dipakai sebagai ambang batas laju perkolasi/permeability yang dibutuhkan untuk wilayah Manado.

5.6 Hasil Pemeriksaan Laboratorium Terhadap Sifat-sifat Agregat

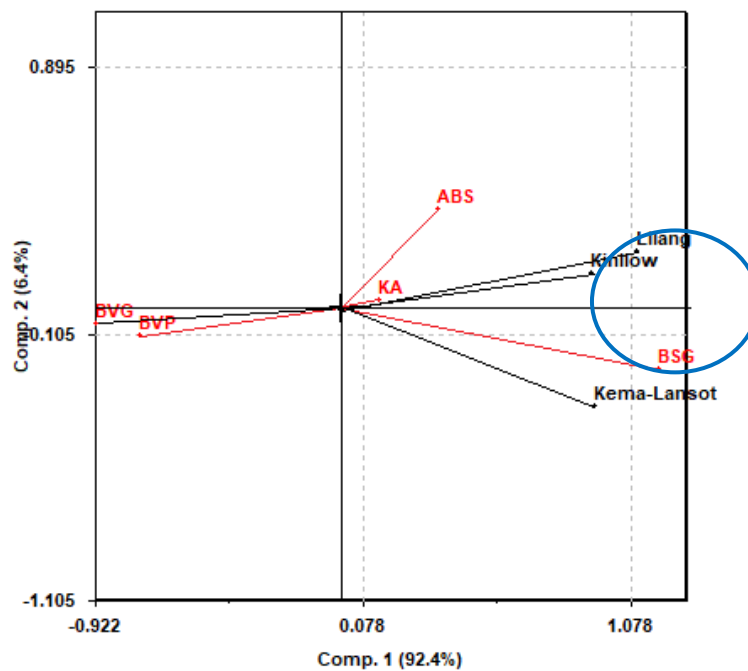
Pekerjaan laboratorium awal dilakukan terhadap pengujian sifat-sifat agregat (aggregate properties). Berdasarkan ketersediaan material, telah ditetapkan 3 (tiga) jenis asal lokasi material yaitu: 1) Kinilow, 2) Kema-Lansot, dan 3) Lilang.

Hasil pemeriksaan laboratorium terhadap sifat-sifat agregat (aggregate properties) dari ketiga lokasi tersebut diberikan pada tabel berikut ini.

Tabel 8: Aggregate Properties

No	Parameter	ID Objek	Lokasi Pengambilan Agregat		
			Kinilow	Kema-Lansot	Lilang
1	Bulk Specific Gravity	BSG	2,31	2,62	2,46
2	Absorpsi Maksimum	ABS	2,04	1,67	2,21
3	Berat Volum (padat)	BVP	1,28	1,46	1,29
4	Berat Volum (gembur)	BVG	1,21	1,33	1,20
5	Kadar Air	KA	1,63	1,85	2,05
6	Abrasi	ABS	35,52	21,17	21,97

Sebagaimana terlihat pada Tabel 8 bahwa 6 parameter pengujian yang menunjukkan sifat-sifat agregat, masing-masing diberikan ID Objek, dan 3 Lokasi pengambilan agregat dijadikan variable. Sifat-sifat agregat tersebut kemudian dianalisa menggunakan analisis statistika Multivariate Analysis dengan menggunakan Principle Component Analysis (PCA) dengan menggunakan Software Pattern Recognition System (PRS) Sirius. Hasil analisis berupa PCA biplot ditampilkan pada gambar di bawah ini.



Gambar 5: PCA Biplot dari Aggregate Properties

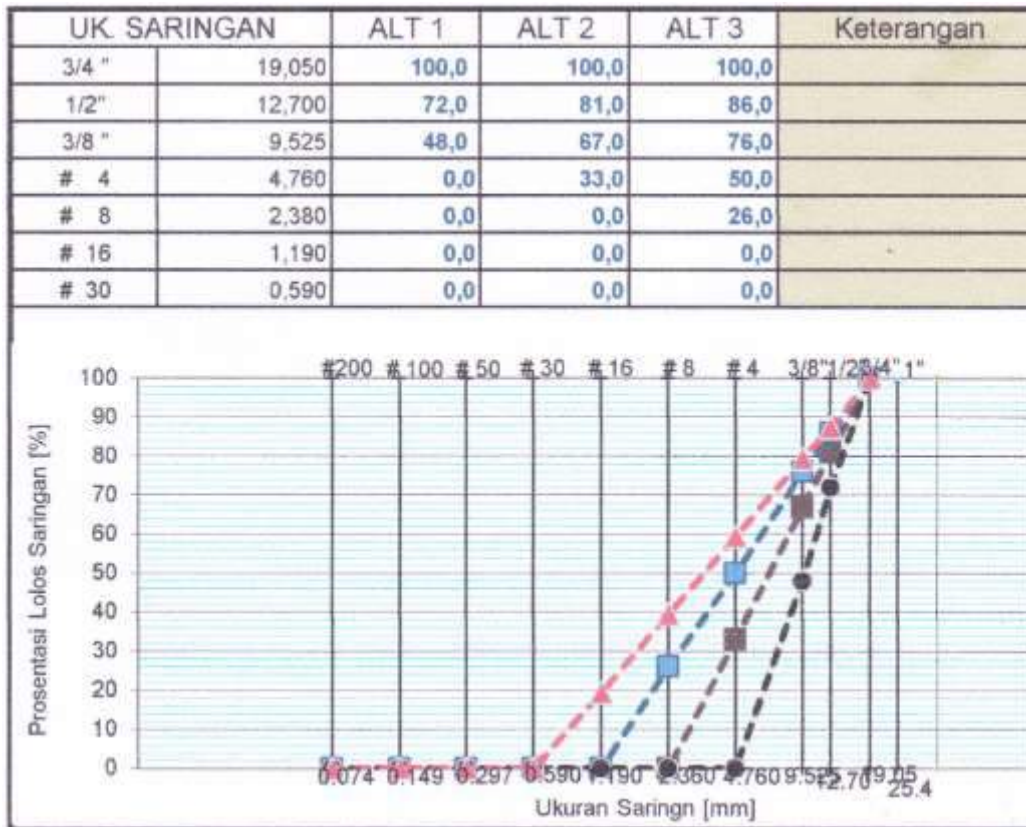
Hasil analisa pada Gambar 5 memperlihatkan bahwa total variance oleh dua principal components (PCs) pertama pada byplot adalah sebesar 98,8% yang berarti sangat cukup untuk dilakukan interpretasi. PCA Biplot pada Gambar 5 memperlihatkan bahwa kedua variable yaitu Kinilow dan Lilang memiliki loading yang sangat berdekatan, artinya kedua jenis agregat tersebut yaitu yang berasal dari Kinilow dan Lilang memiliki kesamaan untuk hampir semua parameter. Karena itu, untuk pengujian selanjutnya dapat digunakan satu jenis saja untuk mewakili keduanya, dalam hal ini dipilih Kinilow. Dengan demikian pengujian-pengujian selanjutnya dilakukan untuk agregat asal Kinilow dan Kema-Lansot.

5.7 Desain Campuran Beton

Kedua jenis material, yakni yang berasal dari Lansot dan Kinilow, kemudian dibuatkan campuran betonnya. Untuk kedua jenis agregat tersebut, masing-masing dibuatkan sampel dengan komposisi agregat yang berbeda-beda, dalam hal ini perbedaan komposisi agregat tersebut dikategorikan Kasar, Sedang dan Halus. Kategori Kasar artinya ukuran butiran minimum yang digunakan adalah 3/8", kategori Sedang dengan ukuran butiran minimum 4,75 mm (No. 4), dan kategori Halus yakni dengan ukuran butiran minimum 2,36 mm (No. 8). Komposisi agregat di atas ukuran minimum disebarkan proporsional menurut gradasi yang diberikan pada Gambar 6, sedangkan komposisi agregat berdasarkan berat serta komposisi/kandungan semen PC dan air diberikan pada Tabel 9.

Tabel 9: Komposisi Agregat, Semen PC dan Air

UKURAN SARINGAN		BERAT FRAKSI UKURAN AGREGAT			PENGUNAAN AGREGAT
LOLOS	TERTAHAN	ALT 1	ALT 2	ALT 3	
3/4"	1/2"	1596,0	1083,0	798,0	AGR PECAH Ex LANSOT / KINILOW
1/2"	3/8"	1368,0	798,0	570,0	
3/8"	# 4	2736,0	1938,0	1482,0	
# 4	# 8	0,0	1881,0	1368,0	
# 8	# 16	0,0	0,0	1482,0	
# 16	# 30	0,0	0,0	0,0	
Jml Berat		5700,0	5700,0	5700,0	
Kinilow	Semen	1266,7	1341,2	1425,0	Gram
		22,2	23,5	25,0	% Thdp Berat Agr.
		4,50	4,25	4,00	Ratio Agr - PC
	Air	442,0	507,2	602,5	ml
		34,9	37,8	42,3	% Thdp Berat PC
Lansot	Semen	1266,7	1341,2	1425,0	Gram
		22,2	23,5	25,0	% Thdp Berat Agr.
		4,50	4,25	4,00	Ratio Agr - PC
	Air	417,0	482,2	552,5	ml
		32,9	36,0	38,8	% Thdp Berat PC



Gambar 6: Gradasi Agregat

Jumlah sampel yang dibuat untuk material yang berasal dari Kinilow ada 9 sampel, masing-masing 3 sampel untuk tiap kategori (kasar, sedang dan halus), sedangkan jumlah sampel untuk material yang berasal dari Lansot ada 6 sampel, masing-masing 2 sampel untuk tiap kategori.



Gambar 7: Sampel-sampel Porous Pavement Beton

5.8 Hasil Pengujian Permeabilitas dan Kuat Tekan

Sampel-sampel yang dibuat, setelah 7 hari dilakukan pengujian terhadap laju infiltrasinya dan kuat tekannya. Hasil pengujian kuat tekan beton 7 hari kemudian dikonversi menjadi kuat tekan 28 hari, dengan mengambil ketentuan yang diberikan pada Peraturan Beton Indonesia (PBI). Prosedur pengujian infiltrasi dilakukan berdasarkan standar yang ditetapkan dalam SNI, yang dimodifikasi untuk dilakukan terhadap kubus beton berukuran 15 cm x 15 cm x 15 cm. Pada pengujian infiltrasi, laju resapan air diukur pada saat benda uji telah jenuh air sehingga laju infiltrasinya sudah konstan, dengan demikian laju infiltrasi yang diperoleh sebetulnya adalah laju perkolasinya, atau koefisien permeabilitasnya.

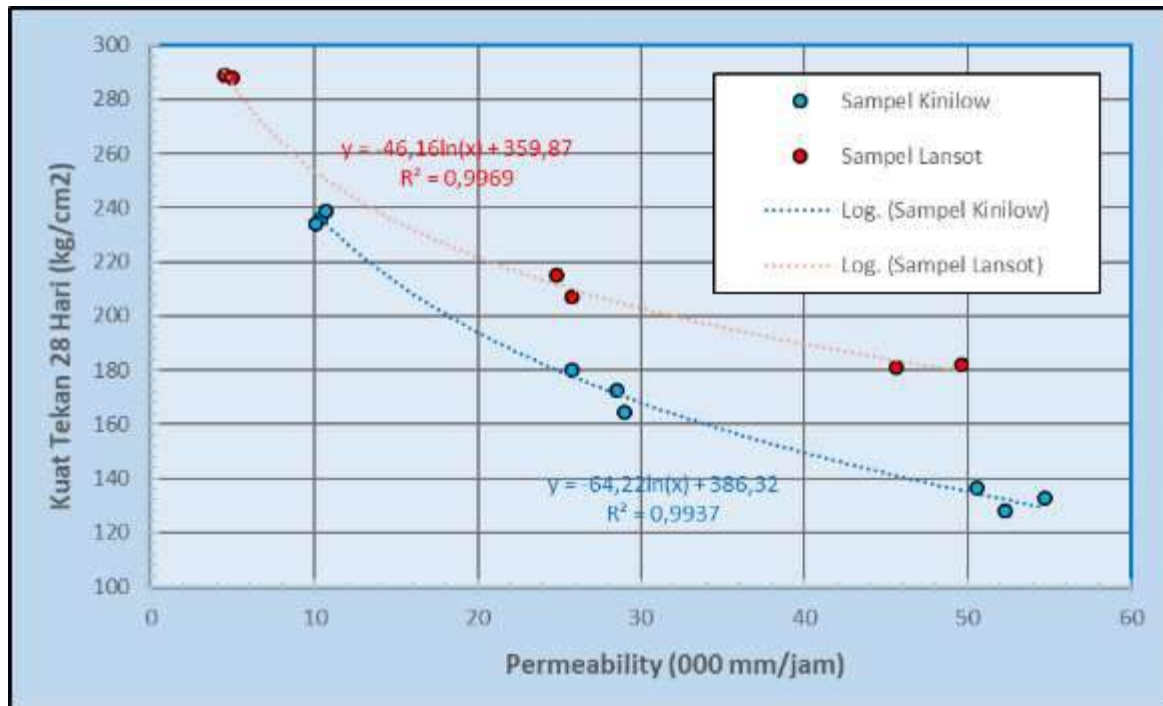
Pengujian kuat tekan beton dilakukan dengan menggunakan alat uji tekan beton yang ada di Laboratorium Rekayasa Material Fakultas Teknik Unsrat. Hasil pengujian infiltrasi dan kuat tekan beton yang dilakukan setelah sampel beumur 7 hari diberikan pada Tabel 10 berikut ini.

Tabel 10: Hasil Pengujian Infiltrasi dan Kuat Tekan Sampel

Asal Agregat	Klasifikasi	Kode Sampel	Laju Peresapan L/det	Permeability (000) mm/jam	Kuat Tekan 7 hari kg/cm ²	Kuat Tekan 28 hari kg/cm ²
KINILOW	HALUS	KH1	0,065	10,40	153,41	236,02
		KH2	0,067	10,72	155,05	238,54
		KH3	0,063	10,08	152,19	234,14
	SEDANG	KS1	0,178	28,48	112	172,31
		KS2	0,181	28,96	107	164,62
		KS3	0,161	25,76	117	180,00
	KASAR	KK1	0,327	52,32	83,28	128,12
		KK2	0,316	50,56	88,79	136,60
		KK3	0,342	54,72	86,14	132,52
LANSOT	HALUS	LH1	0,028	4,48	187,77	288,88
		LH2	0,031	4,96	187,05	287,77
	SEDANG	LS1	0,155	24,80	139,65	214,85
		LS2	0,161	25,76	134,56	207,02
	KASAR	LK1	0,310	49,60	118,35	182,08
		LK2	0,285	45,60	117,53	180,82

5.10 Interpretasi Hasil Pengujian Infiltrasi dan Kuat Tekan

Hasil pengujian yang diberikan pada Tabel 10 di atas kemudian dibuatkan grafik hubungan antara permeability dan kuat tekan beton. Grafik hubungan antara permeability dan kuat tekan beton tersebut diberikan pada Gambar 8 berikut ini.



Gambar 8: Hubungan Antara Permeability dan Kuat Tekan Beton 28 Hari

Hubungan antara permeability dan kuat tekan beton untuk sampel-sampel yang menggunakan material berbeda (agregat Kinilow dan agregat Lansot) terlihat berbeda dan hasilnya harus disendirikan berdasarkan sumber materialnya. Sebagaimana diperlihatkan pada Gambar 8 bahwa Sampel Kinilow (berwarna biru) memiliki trend sendiri yang berbeda dengan trend hasil pengujian terhadap Sampel Lansot (berwarna merah), sehingga hasil pengujian ini tidak dapat digabung untuk menghasilkan satu grafik saja. Dari hasil grafik ini dapat disimpulkan bahwa jenis material yang berbeda ditinjau dari lokasi material memiliki sifat-sifat dan kondisi yang berbeda dari jenis material yang diambil dari tempat lain, sehingga dalam mendesain campuran beton untuk konstruksi rigid porous pavement harus dibedakan berdasarkan lokasi material, karena sifat-sifat material untuk tiap lokasi adalah unik.

Grafik juga memperlihatkan bahwa secara umum, sampel-sampel beton dengan menggunakan material yang berasal dari lokasi Lansot memiliki tingkat kekuatan yang cukup signifikan di

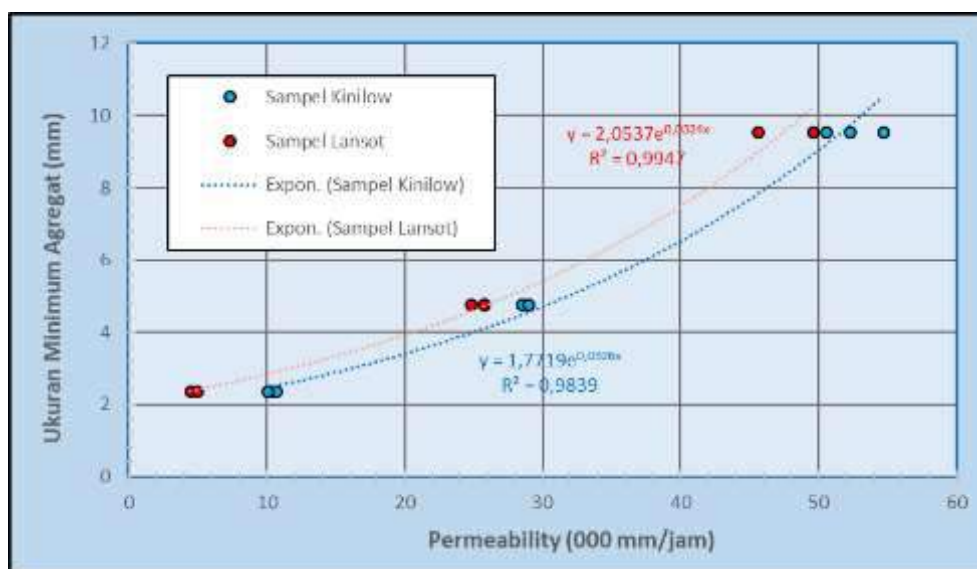
atas tingkat kekuatan sampel-sampel yang menggunakan material yang berasal dari Kinilow. Salah satu penyebabnya adalah nilai keausan pada tes abrasi agregat Lansot jauh di atas nilai keausan agregat Kinilow. Kedua grafik (grafik Lansot dan grafik Kinilow) memperlihatkan hubungan antara permeability dan kuat tekan yakni semakin besar permeabilitynya maka kuat tekan semakin berkurang, dan hubungan ini berupa hubungan trend logaritmik.

Dari Tabel 10 dan Gambar 6 terlihat bahwa semua sampel yang dibuat memiliki kuat tekan beton di atas 130 kg/cm², yang artinya dari segi kekuatan semuanya memenuhi syarat untuk dijadikan bahan konstruksi rigid porous pavement yang peruntukannya adalah lalu lintas dengan beban rendah yang hanya membutuhkan beton dengan kuat tekan 100 kg/cm². Analisis tebal perkerasan jalan dibuatkan tersendiri dan diberikan pada lampiran laporan ini.

Tabel 10 dan Gambar 6 juga memperlihatkan bahwa semua sampel memenuhi syarat permeability karena memiliki koefisien permeabilitas di atas ambang batas yakni sebesar **646 mm/jam**, sedangkan sampel dengan permeabilitas terkecil adalah sampel LH1 dengan koefisien permeabilitas sebesar **4.480 mm/jam**.

5.11 Hubungan antara Permeability dan Ukuran minimum Agregat

Secara logika dapat dipahami bahwa semakin kecil ukuran minimum agregat suatu campuran beton maka permeabilitynya juga akan semakin berkurang, sebaliknya semakin besar ukuran minimum agregat maka permeabilitynya semakin bertambah. Hal ini disebabkan oleh karena ukuran pori dimana air akan lolos pada beton dengan ukuran minimum agregat yang lebih besar juga berukuran lebih besar, sehingga air lebih lancar untuk lolos. Grafik hubungan antara antara ukuran minimum agregat dan permeabilitynya diberikan pada Gambar 9 berikut ini.



Gambar 9: Hubungan Antara Permeability dan Ukuran Minimum Agregat

Dari gambar terlihat bahwa hubungan antara permeability dan ukuran minimum agregat adalah unik untuk masing-masing lokasi agregat dari sampel yang diuji. Hal ini memperkuat hipotesis bahwa setiap material yang diambil dari lokasi agregat yang berbeda perlu diuji tersendiri sebelum digunakan untuk konstruksi rigid porous pavement. Demikian pula dengan gradasi dan komposisi agregat, semen dan air, untuk masing-masing lokasi pengambilan material harus diteliti sendiri-sendiri.

Gambar 9 juga memperlihatkan bahwa hubungan antara permeability dan ukuran minimum agregat untuk kedua jenis agregat berdasarkan lokasi tersebut memiliki hubungan dengan trend eksponensial dengan koefisien determinasi 0,995 dan 0,984 (lebih dari 95 % confidence/dapat dipercaya), artinya trend hubungan ini dapat digunakan untuk menganalisis berapa kira-kira ukuran minimum agregat yang dibutuhkan untuk memperoleh campuran beton rigid porous pavement dengan besar koefisien permeabilitas tertentu.

Sebagaimana telah diuraikan sebelumnya bahwa semua sampel memiliki koefisien permeabilitas jauh di atas ambang batas. Hal ini berarti bahwa masih bisa dibuatkan ukuran komposisi campuran dengan ukuran minimum agregat yang lebih kecil, yang tentu saja akan menghasilkan sampel dengan kuat tekan yang lebih besar. Artinya, dengan komposisi yang menggunakan ukuran minimum agregat yang lebih kecil serta kebutuhan kuat tekan yang tetap, maka komposisi kandungan semen PC dapat dikurangi, yang berarti dapat dilakukan penghematan dari sisi biaya.

Perkiraan ukuran agregat minimum yang dapat digunakan untuk kedua lokasi tersebut dapat dianalisa menggunakan persamaan dari trend hubungan antara Permeability dan Ukuran Minimum Agregat (Gambar 9). Karena trend hubungan antara permeability dan ukuran minimum agregat pada Gambar 9 dibuat berdasarkan sampel-sampel saja, maka perkiraan ukuran agregat minimum yang diperoleh dari persamaan tersebut masih berupa aproksimasi.

Tabel 11: Ukuran Minimum Agregat yang Dapat Digunakan

Lokasi	Persamaan Eksponensial	Ukuran Minimum Agregat (mm)	
		T = 10 Tahun X = 545	T = 20 Tahun X = 647
Lansot	$y = 2,0537e^{0,0324x}$	2,09	2,10
Kinilow	$y = 1,7719e^{0,0326x}$	1,80	1,81

Tabel 11 memperlihatkan bahwa berdasarkan hasil analisa, hampir tidak ada perbedaan ukuran minimum agregat yang dapat digunakan untuk curah hujan dengan perioda 10 tahun dan 20 tahun. Perbedaan terjadi apabila ukuran minimum agregat dibedakan berdasarkan lokasi pengambilan agregat. Dibandingkan dengan ukuran minimum agregat dari sampel-sampel yang dibuat yaitu 2,36 mm (No. 8), ukuran minimum agregat yang diambil dari Lansot adalah **2,10 mm** dan ukuran minimum agregat yang diambil dari Kinilow adalah **1,81 mm**. Dilihat dari ukuran ayakan yang tersedia oleh pabrik, maka untuk **Lansot**, ukuran ayakan terkecil yang di atas 2,10 mm yaitu **2,36 mm (No. 8)**. Artinya, ukuran minimum agregat yang dibuat untuk sampel yaitu 2,36 mm (No. 8) sudah sesuai. Untuk **Kinilow**, ukuran minimum agregatnya adalah 1,81 mm, dan jika dilihat dari ukuran ayakan yang tersedia oleh pabrik maka dapat digunakan ukuran ayakan **2 mm (No. 10)**.

BAB 6. KESIMPULAN DAN SARAN

6.1 Kesimpulan

1. Kedua jenis material lokal yaitu yang diambil dari Lansot maupun dari Kinilow, keduanya memenuhi syarat untuk dijadikan bahan pembuatan rigid porous pavement.
2. Hasil analisa menunjukkan bahwa kedua jenis material yaitu yang diambil dari Lansot dan yang diambil dari Kinilow memiliki sifat-sifat yang sangat berbeda, sehingga untuk memahaminya, analisa terhadap kedua jenis material tersebut harus dipisahkan
3. Hasil pengujian terhadap sampel menunjukkan bahwa permeability dan kuat tekan memiliki hubungan yang erat. Semakin kecil permeability, kuat tekan semakin besar, sebaliknya semakin besar permeabilitynya kuat tekan semakin lemah.
4. Hubungan antara permeability dan kuat tekan ditunjukkan dengan trend logaritmik.
5. Hasil pengujian terhadap sampel-sampel yang dipersiapkan menunjukkan bahwa semua sampel memenuhi syarat baik syarat kuat tekan minimum maupun syarat permeability minimum.
6. Hasil analisa memperlihatkan hubungan antara permeability dan ukuran minimum agregat dari sampel-sampel yang dipersiapkan, dimana semakin kecil ukuran minimum agregat maka permeabilitynya semakin kecil. Hubungan berupa trend eksponensial ini sangat erat diatas 95% confidence, dengan koefisien determinasi sebesar 0,995 untuk agregat dari Lansot dan 0,984 untuk agregat dari Kinilow.
7. Dengan grafik hubungan antara permeability dan ukuran minimum agregat yang memiliki nilai koefisien determinasi yang sangat baik tersebut maka ukuran minimum agregat terbesar dapat dianalisa dan aproksimasi ukuran agregat minimum yang dapat digunakan untuk Lansot adalah 2,36 mm (No. 8), sedangkan untuk Kinilow adalah 2,00 mm (No. 10)

6.2 Saran

Hasil analisa yang diberikan melalui penelitian ini perlu lebih diperdalam lagi, karena belum membahas sisi ekonomis secara lebih mendalam. Komposisi kandungan semen PC dan kandungan air berdasarkan agregat minimum hasil output penelitian ini yaitu 2,36 mm untuk

Lansot dan 2,00 mm untuk Kinilow perlu diteliti kembali untuk menghasilkan komposisi optimum dan ekonomis. Penelitian lanjutan dapat pula dilakukan dengan memberikan perlakuan-perlakuan tertentu seperti misalnya dengan menambahkan serat, dan lain sebagainya

DAFTAR PUSTAKA

1. Angulo-Jaramillo, R., Vandervaere, J.P., Roulier, S., Thony, J.L., Gaudet, J.P., dan Vauclin, M., 2000, 'Field measurement of soil surface hydraulic properties by disc and ring infiltrometers; A review and recent developments', *Soil and Tillage Research*, Vol. 55, No. 1-2, pp. 1-29.
2. Asiyanto, 2010, 'Metode Konstruksi Proyek Jalan'. Universitas Indonesia Press: Jakarta
3. Boogaard, F., Lucke, T., Van de Giesen, N., and Van de Ven, F., 2014, 'Evaluating the Infiltration Performance of Eight Dutch Permeable Pavements Using a New Full-Scale Infiltration Testing Method', *Water*, Vol. 6, pp. 2070-2083
4. BPS Sulut, 2015, 'Sulawesi Utara dalam Angka 2015', Badan Pusat Statistik Sulawesi Utara: Manado
5. Brown, R., (2005), 'Impediments to Integrated Urban Stormwater Management: The Need for Institutional Reform', *Environmental Management*, Vol. 36, No. 3, pp. 455-468.
6. Browne, D., Deletic, A., Fletcher, T.D., Mudd, G., 2011, 'Modeling the development and consequences of clogging for stormwater infiltration trenches, 12th International Conference on Urban Drainage, Porto Alegre/Brazil, 11-16 September 2011
7. Chow, V.T., Maidment, D.R., dan Mays, L.W., 1988, 'Applied hydrology', McGraw-Hill, Inc.: New York.
8. Clar, M. L., Barfield, B. J. dan O'Connor, T. P., (2004), 'Stormwater Best Management Practice Design Guide, Volume 1: General Considerations', Cincinnati, OH: U.S. Environmental Protection Agency.
9. Coughlin, J. P., Campbell, C. D., and Mays, D. C., 2011, 'Infiltration and Clogging by sand and clay in a pervious concrete pavement system,' *Journal of Hydrologic Engineering*, Vol. 17, No. 1, pp. 68– 73
10. 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.
11. Goonetilleke, A. dan 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.
12. Goonetilleke, A., Thomas, E., Ginn, S. dan 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.
13. Green, W. H. dan 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.

14. Haverkamp, R., Ross, P. J., Smettem, K. R. J., dan Parlange, J. Y., 1994, 'Three dimensional analysis of infiltration from the disc infiltrometer. Part 2. Physically based infiltration equation', *Water Resour. Res.*, Vol. 30, pp. 2931-2935.
15. Hengren, L., Goonetilleke, A. dan Ayoko, G. A., 2006, 'Analysis of heavy metals in road-deposited sediments', *Analytica Chimica Acta*, Vol. 571, No. 2, pp. 270-278.
16. Lloyd, S. D., Wong, T. H. F. dan Chesterfield, C. J., 2002, 'Water Sensitive Urban Design - A Stormwater Management Perspective', Industry Report 02/10, Melbourne, Cooperative Research Centre for Catchment Hydrology
17. Lucke, T., 2012, 'Field Investigation of Reduction in Infiltration Capacity in a Permeable Pavement System Due To Clogging', SUDSNET International Conference 2012, Coventry UK
18. Mangangka, I. R., Egodawatta, P., Parker, N., Gardner, T., dan Goonetilleke, A., 2013, 'Performance characterisation of a constructed wetland', *Water Science & Technology*, Vol. 68, No. 10, pp. 2195-2201.
19. Mangangka, I. R., Liu, A., Egodawatta, P., dan Goonetilleke, A., 2015, 'Performance characterisation of a stormwater treatment bioretention basin', Vol. 150, pp. 173-178.
20. Mbagwu, J. S. C., 1995, 'Testing the goodness of fit of infiltration models for highly permeable soils under different tropical soil management systems', *Soil and Tillage Research*, Vol 34, No, 3, pp. 199-205.
21. Philip, J. R., 1957, 'The theory of infiltration. Sorptivity and algebraic infiltration', *Soil Sci.*, Vol. 84, pp. 257-264.
22. Prakash, A., (2005), 'Impact of urbanization in watersheds on stream stability and flooding', *Proceedings of the Watershed Management Conference* (eds), Williamsburg, Virginia.
23. Valerio C. Andrés-Valeri, Mariana Marchioni, Luis Angel Sañudo-Fontaneda, Filippo Giustozzi and Gianfranco Becciu, 2016, 'Laboratory Assessment of the Infiltration Capacity Reduction in Clogged Porous Mixture Surfaces', *Sustainability* Vol. 8, 751
24. Vandervaere, J. P., Peugeot, C., Vauclin, M., Jaramillo, R. A., dan Lebel, T., 1997, 'Estimating hydraulic conductivity of crusted soils using disc infiltrometers and minitensiometers', *Journal of Hydrology*, Vol. 188-189, No. 1-4, pp. 203-223.
25. Victorian Stormwater Committee, (1999), 'Urban stormwater: Best practice environmental management guidelines', Collingwood VIC: CSIRO Publishing
26. Wong, T., Breen, P. dan Lloyd, S., 2000, 'Water sensitive road design - Design options for improving stormwater quality of road runoff', Technical Report, Report 00/1, Cooperative Research Centre (CRC) for Catchment Hydrology.

27. 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
28. Zang, R., 1997, 'Determination of soil sorptivity and hydraulic conductivity from the disc infiltrometer', Soil Sci. Soc. Am. J., Vol. 61, pp. 1024- 1030.

Foto-foto Kegiatan Penelitian





