



UNIVERSITAS INDONESIA

**STUDI PENGEMBANGAN ALAT INSTALASI PENGUKURAN
INFILTRASI PERKERASAN JALAN TEMBUS AIR
MENGUNAKAN *PERVIOUS CONCRETE***

SKRIPSI

RAHAYADI KARNAIN

040401060Y

**FAKULTAS TEKNIK
PROGRAM STUDI TEKNIK SIPIL
DEPOK
JUNI 2010**

949/FT.01/SKRIP/07/2010



UNIVERSITAS INDONESIA

**STUDI PENGEMBANGAN ALAT INSTALASI PENGUKURAN
INFILTRASI PERKERASAN JALAN TEMBUS AIR
MENGUNAKAN *PERVIOUS CONCRETE***

SKRIPSI

Diajukan sebagai salah satu syarat memperoleh gelar Sarjana Teknik

RAHAYADI KARNAIN

040401060Y

**FAKULTAS TEKNIK
PROGRAM STUDI TEKNIK SIPIL
KEKHUSUSAN MANAJEMEN SUMBER DAYA AIR
DEPOK
JUNI 2010**

HALAMAN PERNYATAAN ORISINALITAS

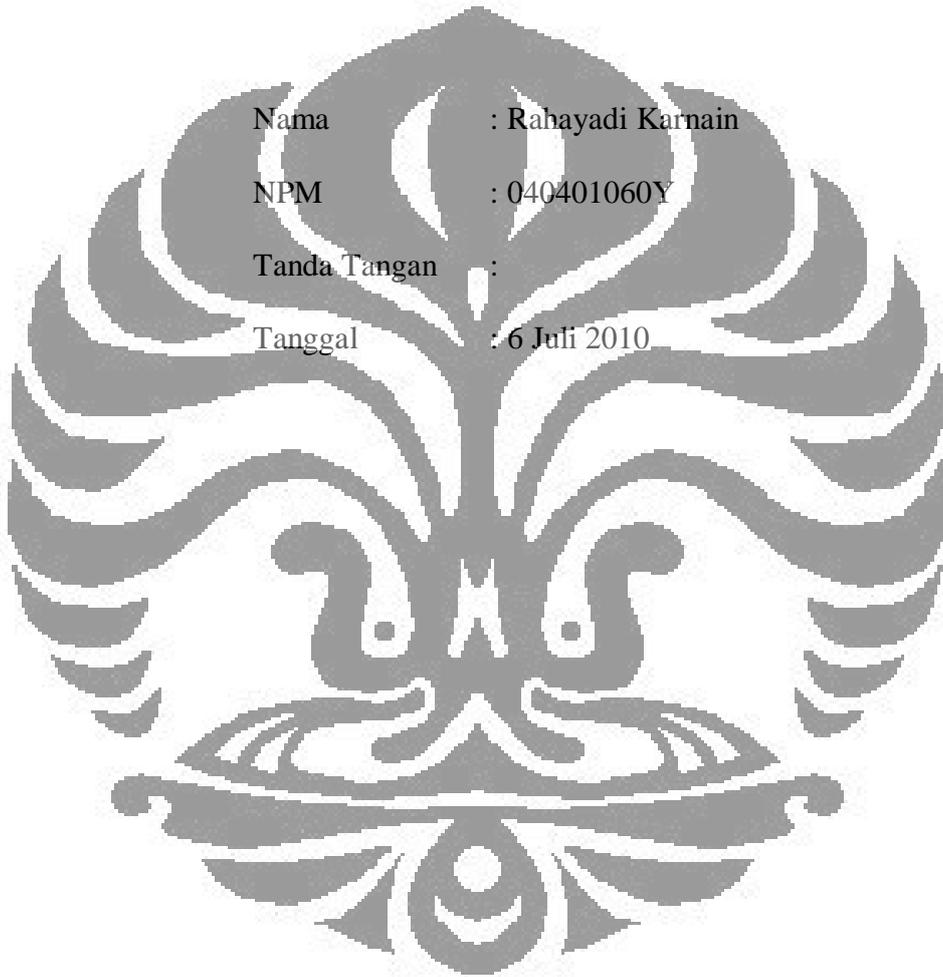
**Skripsi ini adalah hasil karya saya sendiri, dan
semua sumber baik yang dikutip maupun dirujuk
telah saya nyatakan dengan benar.**

Nama : Rahayadi Karnain

NPM : 040401060Y

Tanda Tangan :

Tanggal : 6 Juli 2010



LEMBAR PENGESAHAN

Skripsi ini diajukan oleh :

Nama : Rahayadi Karnain

NPM : 040401060Y

Program Studi : Teknik Sipil

Judul Skripsi : Studi Pengembangan Alat Instalasi Pengukuran Infiltrasi
Perkerasan Jalan Tembus Air Menggunakan *Pervious Concrete*

Telah berhasil dipertahankan di hadapan Dewan Penguji dan diterima sebagai bagian persyaratan yang diperlukan untuk memperoleh gelar Sarjana Teknik pada Program Studi Teknik Sipil Fakultas Teknik Universitas Indonesia.

DEWAN PENGUJI

Pembimbing : Ir. Herr Soeryantono, M.Sc, Ph.D ()

Pembimbing : Dr. Ir. Wiwik Rahayu, DEA ()

Penguji : Dr. Ing. Ir. Dwita Sutjiningsih, Dipl.HE ()

Penguji : Dr. Ir. Sigit P. Hadiwardoyo, DEA ()

Ditetapkan di : Depok

Tanggal : 6 Juli 2010

HALAMAN PERNYATAAN PERSETUJUAN PUBLIKASI TUGAS AKHIR UNTUK KEPENTINGAN AKADEMIS

Sebagai sivitas akademik Universitas Indonesia, saya yang bertanda tangan di bawah ini :

Nama : Rahayadi Karnain
NPM : 040401060Y
Program Studi : Teknik Sipil
Departemen : Teknik Sipil
Fakultas : Teknik
Jenis karya : Skripsi

demikian demi pengembangan ilmu pengetahuan, menyetujui untuk memberikan kepada Universitas Indonesia **Hak Bebas Royalti Noneksklusif (Non-exclusive Royalty-Free Right)** atas karya ilmiah saya yang berjudul :

Studi Pengembangan Alat Instalasi Pengukuran Infiltrasi Perkerasan Jalan
Tembus Air Menggunakan *Pervious Concrete*

beserta perangkat yang ada (jika diperlukan). Dengan Hak Bebas Royalti Noneksklusif ini Universitas Indonesia berhak menyimpan, mengalihmedia/format-kan, mengelola dalam bentuk pangkalan data (database), merawat, dan memublikasikan tugas akhir saya selama tetap mencantumkan nama saya sebagai penulis/pencipta dan sebagai pemilik Hak Cipta.

Demikian pernyataan ini saya buat dengan sebenarnya.

Dibuat di : Depok
Pada tanggal : 6 Juli 2010

Yang menyatakan

(Rahayadi Karnain)

KATA PENGANTAR

Puji syukur saya kepada Tuhan Yang Maha Esa, karena atas berkat dan rahmat-Nya, skripsi saya yang berjudul "Studi Pengembangan Alat Instalasi Pengukuran Infiltrasi Perkerasan Jalan Tembus Air Menggunakan *Pervious Concrete*" dapat terselesaikan dengan baik. Penulisan skripsi ini dilakukan dalam rangka memenuhi salah satu syarat untuk mencapai gelar Sarjana Teknik Jurusan Teknik Sipil pada Fakultas Teknik Universitas Indonesia. Saya menyadari bahwa, tanpa bantuan dan bimbingan dari berbagai pihak, dari masa perkuliahan sampai pada penyusunan skripsi ini, sangatlah sulit bagi saya untuk menyelesaikan skripsi ini. Oleh karena itu, saya mengucapkan terima kasih kepada:

- (1) Ir. Heri Soeryantono, M.Sc, Ph.D dan Dr. Ir. Wiwik Rahayu, DEA, selaku dosen pembimbing yang telah menyediakan waktu, tenaga, pikiran dan kesabarannya serta memberikan pengarahan, diskusi dan bimbingan dalam penyusunan skripsi ini sehingga dapat selesai dengan baik;
- (2) Papa, Mama, Maktuo, Paktuo, dan Nenek dan yang telah memberikan bantuan moral, materil dan doanya yang tak pernah berhenti untuk kesuksesan penyelesaian skripsi ini;
- (3) Pembimbing Akademik Bu Elly Tjahjono DEA yang telah membantu studi saya dari awal hingga pembuatan skripsi, terima kasih atas bimbingan dan kesabarannya selama ini;
- (4) PT. Geosinindo yang telah memberikan sumbangan geotekstil nya untuk pengerjaan skripsi ini;
- (5) Karyawan Laboratorium Mekanika Fluida: Pak Bagyo dan Mbak Wit, Karyawan Laboratorium Bahan : Pak Samin dan Karyawan laboratorium Mekanika Tanah : Pak Sapruddin dan Antoyang telah sangat membantu dalam pengambilan data dan pembuatan model fisik skripsi ini;
- (6) Adik-adik tersayang Ilham, Hiddali dan Delia yang telah memberikan semangatnya dan harapannya untuk keberhasilan saya dalam mengerjakan skripsi;

- (7) Keluarga di Kedoya, Bandar Purus, Kurao, Aciak, Tante Atik, Ni Eka, Da Opi, Etri, Ni Ade, Puput, Robby, atas segala semangat, doa dan bantuan yang telah diberikan;
- (8) Sahabat-sahabat terbaikku Dayat, Ramos, Ina, Destia, Indra, Mba Nia, Mba Evie, Febi, Wegik, Jamal, Deni, Giyot, Hanan, Malvie, Risma untuk segala doa dan semangatnya;
- (9) Ceper, Sondhie, Sugondo, Dilla, Joko, Tibo dan Sammy, sebagai sesama lulusan 6 tahun dan teman-teman angkatan 2004 lainnya yang telah berjuang bersama sejak awal kuliah di Sipil;
- (10) Michael, Arif, Suteben, Bima dan Bhisma, teman-teman kosan yang selalu mengingatkan untuk mengerjakan skripsi;
- (11) Pihak lainnya yang tidak dapat disebutkan satu-persatu;

Akhir kata, saya berharap Tuhan Yang Maha Esa membalas segala kebaikan semua pihak yang telah membantu. Semoga skripsi ini dapat bermanfaat bagi pengembangan ilmu.

Depok, Juli 2010

Penulis

ABSTRAK

Nama : Rahayadi Karnain
Program Studi : Teknik Sipil
Judul : Studi Pengembangan Alat Instalasi Pengukuran Infiltrasi Perkerasan Jalan Tembus Air Menggunakan *Pervious Concrete*

Konsep *Low Impact Development* (LID) menjadi alternatif dalam pengelolaan limpasan hujan. Salah satu aplikasi LID adalah *permeable pavement* yaitu perkerasan jalan yang *porous* (tembus air) yang dapat menyerap air ke tanah. Contoh aplikasi *permeable pavement* ini adalah *pervious concrete*. Namun perkerasan jalan yang *porous* akan membuat tanah dasar menjadi basah dan jenuh air sehingga menyebabkan tanah dasar kehilangan kekuatannya. Pada penelitian ini akan dilakukan pengembangan instalasi pengukuran terhadap kapasitas infiltrasi dari lapisan perkerasan jalan dengan lapisan permukaan *pervious concrete* yang direncanakan untuk jalan lingkungan. Daya dukung tanah dasar yang diperlihatkan dengan nilai CBR juga akan diuji sehingga bisa dibandingkan nilai CBR sebelum dan setelah infiltrasi.

Penelitian ini dilakukan di lingkungan FTUI dengan menggunakan lapisan perkerasan atas *pervious concrete* serta pendekatan untuk jalan lentur, dibuat sebuah model fisik untuk dilakukan pengukuran infiltrasi dari model ini. Penelitian ini menghasilkan standar pembuatan model untuk pengukuran infiltrasi dan daya dukung tanah dasar pada struktur perkerasan jalan *permeable*.

Kata kunci: *permeable pavement*, *pervious concrete*, instalasi alat ukur, CBR

ABSTRACT

Name : Rahayadi Karnain

Study Program : Civil Engineering

Title : Study of Infiltration Measurement Instalation Development for Porous Pavement Using Pervious Concrete

The concept of Low Impact Development (LID) to an alternative in the management of runoff. One of the LIDs are permeable pavement applications is a porous pavement that can trough water into the soil. Example of permeable pavement applications is pervious concrete. However, the porous pavement will create the foundation soil becomes wet and saturated with water, causing loss of subgrade strength. In this research, the development will be carried out measurements installations against infiltration capacity of a pavement layer with a layer of pervious concrete surface that planned for low-class street. Subgrade bearing capacity of which is shown by the CBR value will also be tested so that the CBR values could be compared before and after infiltration.

This research was held in FTUI with the use of pervious concrete pavement layer using a flexible approach to the road, created a physical model for the infiltration measurements were taken from this model. This research was produced using a standard measuring tool of infiltration and soil bearing capacity on the basis of permeable pavement systems.

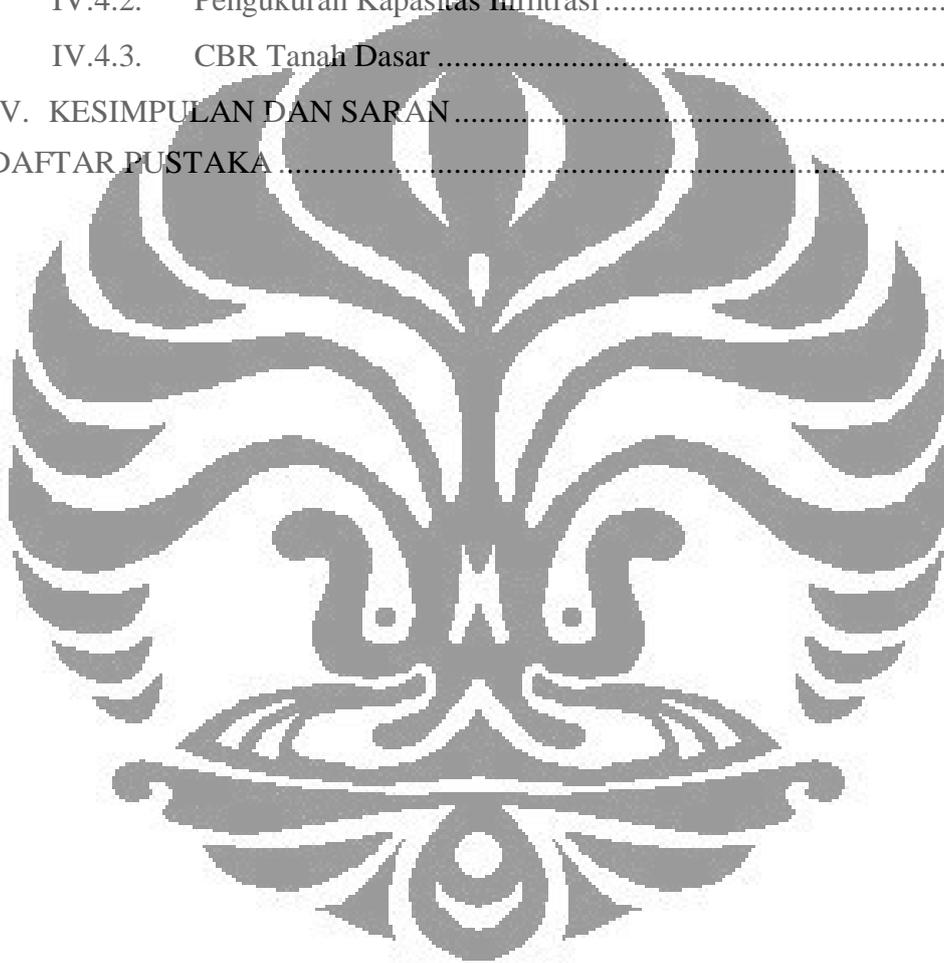
Keywords: permeable pavement, pervious concrete, installation of measuring devices, CBR

DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL	i
HALAMAN PERNYATAAN ORISINALITAS	ii
LEMBAR PENGESAHAN.....	iii
HALAMAN PERNYATAAN PERSETUJUAN PUBLIKASI.....	iv
KATA PENGANTAR	v
ABSTRAK	vii
ABSTRACT	viii
DAFTAR ISI	ix
DAFTAR GAMBAR.....	xii
DAFTAR TABEL	xv
I. PENDAHULUAN.....	1
I.1. Latar Belakang.....	1
I.2. Tujuan Penelitian.....	4
I.3. Batasan Dan Ruang Lingkup Penelitian	4
I.4. Metodologi Penelitian.....	5
I.5. Sistematika Penulisan	8
II. TINJAUAN PUSTAKA	9
II.1. LID Sebagai Konsep Pengendalian Limpasan Hujan.....	9
II.2. Perkerasan Jalan Lentur.....	11
II.3. Perkerasan Jalan Lentur Menggunakan Permukaan <i>Pervious Concrete</i>	21
II.3.1. Keuntungan <i>Pervious concrete</i>	21
II.3.2. Bahan Pembentuk <i>Pervious Concrete</i>	22
II.3.3. Pemanfaatan Geotekstil Untuk pemisah Antar Lapisan Pada Pembuatan Jalan <i>Permeable</i>	24
II.3.4. Pembuatan Lapisan Kedap Air Dengan Stabilisasi Tanah Dasar	25
II.4. Pengukuran Kapasitas Infiltrasi.....	26
II.4.1. Metode Horton.....	26
II.4.2. Metode NRCS.....	27
II.4.3. Metode Rasional	29

II.5.	Pengujian Daya Dukung	30
II.6.	Hasil Penelitian Mengenai <i>Permeable Pavement</i> Di Departemen Teknik Sipil.....	31
III.	RANCANGAN PERCOBAAN	34
III.1.	Pertimbangan Disain.....	34
III.1.1.	Lokasi Penelitian.....	34
III.1.2.	Karakteristik Material Penyusun.....	37
III.1.3.	Pengukuran Yang Dibutuhkan.....	38
III.1.4.	Disain Rekomendasi.....	39
III.2.	Modifikasi Disain <i>Permeable Pavement</i>	40
III.2.1.	Perencanaan Tebal Perkerasan.....	41
III.2.2.	Gambar Rencana Model Fisik Jalan <i>Permeable</i>	48
III.2.3.	Rancang Campur Lapisan Perkerasan.....	49
III.3.	Alat dan Bahan	51
III.3.1.	Konstruksi Model Fisik Jalan Permeabel	51
III.3.2.	Instalasi Simulator Hujan	53
III.3.3.	Alat CBR	56
III.3.4.	Persiapan Material.....	57
III.4.	Prosedur Penelitian	61
III.4.1.	Persiapan Lahan	61
III.4.2.	Persiapan Alat Ukur dan Batasan Pengukuran	62
III.4.3.	Pembuatan Lapisan Perkerasan Atas Model Fisik	62
III.4.4.	Instalasi Model Fisik	62
III.4.5.	Pengukuran Daya Infiltrasi.....	64
III.4.6.	Pengukuran CBR Lapangan	66
IV.	PEMBUATAN BENDA UJI DAN PENGOPERASIAN MODEL FISIK KONSTRUKSI JALAN <i>PERMEABLE PAVEMENT</i>	67
IV.1.	Pembuatan <i>Pervious Concrete</i> Sebagai Lapisan Perkerasan Atas	67
IV.2.	Pelaksanaan Konstruksi Model Fisik Jalan <i>Permeable</i>	70
IV.2.1.	Model Fisik Struktur Jalan <i>Permeable Pavement</i>	71
IV.2.2.	Instalasi Hujan Buatan.....	77

IV.3. Pengambilan Data CBR dan Infiltrasi Model Fisik.....	77
IV.3.1. Pengambilan Data CBR (California Bearing Ratio) Lapangan Sebelum Infiltrasi.....	77
IV.3.2. Pengambilan Data Infiltrasi	80
IV.3.3. Data CBR Lapangan Setelah Infiltrasi	84
IV.4. Penilaian Terhadap Penerapan Alat.....	89
IV.4.1. Stabilisasi Tanah Dasar	89
IV.4.2. Pengukuran Kapasitas Infiltrasi	91
IV.4.3. CBR Tanah Dasar	93
IV. KESIMPULAN DAN SARAN.....	96
DAFTAR PUSTAKA.....	100



DAFTAR GAMBAR

Gambar 1.1. Metodologi Penelitian	7
Gambar 2.1. Berbagai macam Contoh Permeable Pavement	10
Gambar 2.2. Lapisan Pondasi Perkerasan Jalan Lentur	12
Gambar 2.3. Kondisi Perkerasan Lentur Berkaitan dengan Lapisan Pondasi	13
Gambar 2.4. Kondisi Subgrade pada Galian.....	14
Gambar 2.5. Kondisi Subgrade pada Timbunan.....	14
Gambar 2.6. Contoh Pervious Concrete	21
Gambar 2.7. Kurva Laju Infiltrasi.....	27
Gambar 3.1. Grafik perolehan θ -optimum dan θ -dry maksimum.....	35
Gambar 3.2. Grafik Penetration vs Resistance pada uji CBR laboratorium tanah dasar.....	35
Gambar 3.3. Grafik gradasi butiran pada tanah dasar.....	37
Gambar 3.4. Desain jalan Voided PCP (Porous Concrete Pavement) dengan sistem underdrain.....	40
Gambar 3.5. Desain jalan PCP (Porous Concrete Pavement) dengan underdrain	40
Gambar 3.6. Korelasi DDT dan CBR.....	44
Gambar 3.7. Penentuan tebal perkerasan dengan nomogram 8.....	45
Gambar 3.8. Desain modifikasi jalan permeabel dengan porous asphalt : (a) tampak atas; (b) potongan A-A; dan (c) potongan B-B	49
Gambar 3.9. Beberapa perlengkapan untuk merakit instalasi hujan simulator, yaitu kunci inggris, kran, seal tape, obeng dan klem selang (dari atas ke bawah).....	53
Gambar 3.10. Gambar Simulasi Hujan	54
Gambar 3.11. Pemasangan cincin selang pada kran sumber air	55
Gambar 3.12. Instalasi hujan simulasi.....	56
Gambar 3.13. Alat ukur dan pengukuran CBR lapangan.....	57
Gambar 3.14. Saringan yang digunakan untuk meloloskan agregat.....	59
Gambar 3.15. Sekop, karung-karung berisi agregat #4 dan terpal pelindung hujan	59

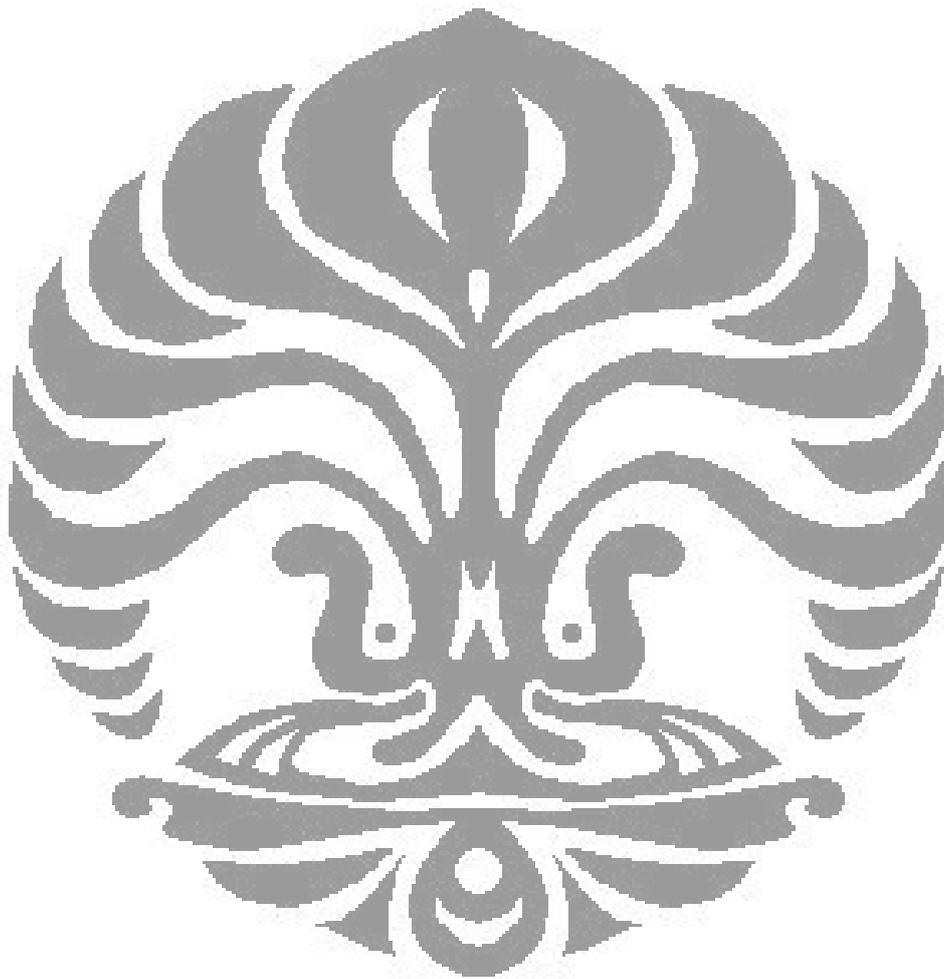
Gambar 3.16. Pipa berlubang dibungkus dengan kain kasa dan disambung dengan knee	60
Gambar 3.17. Sambungan selang dengan meteran air untuk instalasi hujan simulasi.....	64
Gambar 3.18. Model instalasi hujan simulasi.....	65
Gambar 4.1. Alat kompaktor (Kiri) dan bekisting serta pervious concrete (kanan)	68
Gambar 4.2. Pengujian sedarhana kelulusan air beton.....	69
Gambar 4.3. Pervious concrete	70
Gambar 4.4. Lapisan kapur sebelum dipadatkan	71
Gambar 4.5. Angkur dan kanal 1,25 m sebagai penahan beban	72
Gambar 4.6. Pemasangan angkur di kedua sisi galian untuk pemeriksaan CBR lapangan.....	72
Gambar 4.7. Alat ukur dan pengukuran CBR lapangan.....	73
Gambar 4.8. Pemadatan tanah dengan menggunakan stamper.....	73
Gambar 4.9. Pemadatan lapisan pasir	74
Gambar 4.10. Pengujian CBR Lapisan Pasir.....	75
Gambar 4.11. Pemasangan geotekstil non woven sebagai separator.....	75
Gambar 4.12. Proses pemasangan pervious concrete	76
Gambar 4.13. Proses pengambilan data Infiltrasi	77
Gambar 4.14. Grafik hubungan Penetrasi vs Ketahanan tanah untuk uji CBR tanah dasar stabilisasi	78
Gambar 4.15. Grafik hubungan Penetrasi vs Ketahanan tanah untuk uji CBR lapisan pasir	79
Gambar 4.16. Grafik hubungan Penetrasi vs Ketahanan tanah untuk uji CBR lapisan split dengan ukuran ASTM #4.....	80
Gambar 4.17. Debit Hujan Simulasi Pengambilan data pertama.....	82
Gambar 4.18. Akumulasi Infiltrasi Pengambilan data pertama.....	82
Gambar 4.19. Debit Hujan Simulasi pengambilan data kedua.....	83
Gambar 4.20. Akumulasi Infiltrasi Pengambilan data Kedua	84
Gambar 4.21. Pemasangan Angkur dan Setelah angkur terpasang dengan baik dikedua sisi benda uji	85

Gambar 4.22. Pembongkaran lapisan pervious concrete.....	85
Gambar 4.23. Grafik Hubungan penetrasi dengan ketahanan tanah untuk uji CBR split ukuran ASTM #4	86
Gambar 4.24. Pemasangan angkur dan besi kanal untuk pengukuran CBR	86
Gambar 4.25. Grafik hubungan penetrasi dengan ketahanan tanah untuk uji CBR lapisan pasir	87
Gambar 4.26. Grafik hubungan penetrasi dengan ketahanan tanah untuk uji CBR lapisan kapur	88
Gambar 4.27. Penetrasi Lapisan Tanah Dasar	89
Gambar 4.28. Grafik horton pada pengambilan data pertama	91
Gambar 4.29. Grafik Horton pada pengambilan data kedua	92
Gambar 4.30. Posisi pengambilan data infiltrasi	93
Gambar 4.31. Posisi tempat keluarnya air dari hujan simulasi.....	93
Gambar 5.1. Metode Pembuatan Alat Ukur Permeable Pavement	97
Gambar 5.2. Posisi Pipa pada konstruksi	98
Gambar 5.3. Bagan instalasi simulator hujan	99

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1.	Distribusi Kendaraan (c) untuk kendaraan ringan dan berat yang lewat pada Lajur rencana.....	15
Tabel 2.2.	Angka ekivalen (E) beban sumbu kendaraan	16
Tabel 2.3.	Batas-batas minimum tebal lapisan perkerasan	17
Tabel 2.4.	Indeks permukaan pada akhir umur rencana (Ipt)	18
Tabel 2.5.	Indeks permukaan pada awal usia rencana (Ipo)	19
Tabel 2.6.	Koefisien kekuatan relatif (a)	20
Tabel 2.7.	Nilai CBR dan penggunaannya:.....	31
Tabel 3.1.	Data uji CBR laboratorium untuk tanah dasar	36
Tabel 3.2.	Hasil Uji CBR laboratorium untuk tanah dasar	36
Tabel 3.3.	Persentase nilai CBR tanah dasar di lapangan.....	36
Tabel 3.4.	Daftar Porositas.....	47
Tabel 3.5.	Daftar Nilai Koefisien Pemeabilitas.....	47
Tabel 3.6.	Tabel Kebutuhan Material Untuk Pervious Concrete	50
Tabel 3.7.	Campuran bahan untuk 1 cetakan	50
Tabel 3.8.	Tabel rencana pengambilan data hujan	66
Tabel 4.1.	Mix design.....	68
Tabel 4.2.	Persentase nilai CBR tanah dasar stabilisasi dengan kapur di lapangan.....	74
Tabel 4.3.	Persentase nilai CBR Lapisan pasir	75
Tabel 4.4.	Persentase nilai CBR Lapisan split dengan ukuran ASTM #4	76
Tabel 4.5.	Persentase nilai CBR tanah dasar stabilisasi dengan kapur di lapangan.....	78
Tabel 4.6.	Persentase nilai CBR tanah dasar di lapangan.....	78
Tabel 4.7.	Persentase nilai CBR Lapisan pasir	79
Tabel 4.8.	Hasil Uji CBR pasir di laboratorium.....	79
Tabel 4.9.	Persentase nilai CBR Lapisan split dengan ukuran ASTM #4	80
Tabel 4.10.	Data Infiltrasi 1	81
Tabel 4.11.	Data Hujan dan Infiltrasi 2	83
Tabel 4.12.	Split ASTM #4	85

Tabel 4.13.	Nilai CBR lapisan Pasir	87
Tabel 4.14.	Nilai CBR lapisan Kapur	87
Tabel 4.15.	Nilai CBR Tanah Dasar	88
Tabel 4.16.	Tabel rekapitulasi nilai CBR.....	94



BAB I

PENDAHULUAN

I.1. LATAR BELAKANG

Seiring dengan pertumbuhan penduduk, maka kebutuhan akan lahan semakin meningkat sehingga terjadi perubahan tata guna lahan. Hal ini berdampak pada semakin banyaknya daerah *impermeable*. Lahan yang semula merupakan daerah terbuka hijau berubah menjadi pemukiman, jalan, industri dan niaga. Akibatnya, jumlah air hujan yang menjadi limpasan permukaan semakin meningkat.

Hasil studi (Tunggul Sutan Haji, 2005) mengenai perubahan tata guna lahan di Sub DAS Ciliwung hulu dengan titik outlet bendung Katulampa (Ciawi) menunjukkan bahwa peningkatan debit puncak banjir sangat dipengaruhi oleh besarnya penyusutan luas hutan. Penyusutan luas hutan sebesar 20% dari 80% ke 60% menyebabkan terjadinya peningkatan debit puncak banjir sebesar 15%. Sementara itu, jika pengurangan 20% dari total hutan 60% menjadi 40%, debit banjir puncak meningkat signifikan sebesar 50%. Sehingga dengan perubahan tata guna lahan yang cepat menyebabkan semakin meningkatnya masalah limpasan permukaan.

Untuk mengatasi masalah limpasan permukaan yang semakin meningkat, metode yang selama ini dilakukan adalah dengan membuat saluran drainase berdasarkan jumlah hujan harian maksimum yang turun, besarnya lahan *impermeable*, dan besarnya infiltrasi air ke dalam tanah. Besarnya lahan *impermeable* dan semakin sedikitnya infiltrasi air ke tanah menyebabkan dimensi saluran drainase semakin besar. Saluran drainase yang semakin besar berakibat pada waktu konsentrasi semakin pendek. Pendeknya waktu konsentrasi akan menyebabkan debit puncak semakin besar. Dengan demikian masalah limpasan permukaan bukannya teratasi, tapi semakin bertambah parah.

Sebagai alternatif, konsep yang sebaiknya diterapkan adalah konsep yang berwawasan lingkungan atau biasa disebut *Low Impact Development* (LID). Konsep ini merupakan penerapan teknologi pengembangan lahan yang menggunakan berbagai cara untuk menahan dan memperlambat aliran limpasan

hujan masuk ke badan air, tanpa menyebabkan timbulnya genangan yang mengganggu guna memberikan kesempatan kepada air untuk meresap ke dalam tanah.

Salah satu aplikasi LID adalah pemasangan *permeable pavement* untuk perkerasan jalan yang dapat menginfiltrasikan air ke dalam tanah sehingga dapat mengurangi jumlah limpasan hujan. Dengan perkerasan yang *porous*, air masuk ke dalam tanah melalui rongga yang terdapat pada setiap lapisan jalan.

Di beberapa negara telah dilakukan penelitian untuk mengkaji kelebihan dan kekurangan pemakaian *permeable pavements*. Hasil penelitian *Environmental Protection Agency* (EPA) menyimpulkan bahwa penggunaan *permeable pavements* dapat menurunkan volume limpasan permukaan dan menurunkan debit puncak secara dramatis. (Booth, 2000). *Permeable pavements* dapat berupa pemakaian *pervious concrete* atau *porous asphalt* sebagai lapisan perkerasan jalan. Kedua bahan ini merupakan modifikasi dari bahan perkerasan jalan konvensional yang telah ada. Di Florida dan beberapa negara bagian di bagian tenggara Amerika telah memakai *pervious concrete* sejak 40 tahun yang lalu untuk mengontrol limpasan hujan.

Di Departemen Teknik Sipil Universitas Indonesia telah dilakukan penelitian mengenai *mix design* dari *pervious concrete* (Ni Made Rahmayati, 2007). Penelitian ini mendapatkan *mix design* yang dari *pervious concrete* dan menguji kekuatan dan porositas dari bahan. Hasil dari penelitian ini adalah rancang campur dari *pervious concrete* dengan kekuatan maksimal yang didapatkan sebesar 130 kg/cm².

Penelitian yang telah dilakukan di Departemen Teknik Sipil Universitas Indonesia hanya mendapatkan *mix design* dari bahan. Belum dilakukan penelitian mengenai penggunaan kedua aplikasi untuk perkerasan jalan. Dalam perancangan sebuah konstruksi jalan/ perkerasan, salah satu kriteria syarat kekuatan /strukturalnya adalah dapat mengalirkan air dan kedap air karena air dapat merusak daya dukung tanah (dasar) dan *interlocking* antar agregat. Daya dukung tanah dasar ditunjukkan dengan nilai *California Bearing Ratio*¹ (CBR). Nilai CBR

¹ Cara CBR dikembangkan oleh *California State Highway Department*

yang tinggi menunjukkan tanah dasar semakin baik untuk suatu perkerasan jalan dan mengurangi tebal perkerasan.

Namun nilai CBR sangat dipengaruhi oleh kadar air. Nilai CBR akan menurun bila kandungan air dalam tanah tersebut meningkat. Hal ini menjadi tantangan dalam pembuatan perkerasan jalan *permeable* karena air yang diserapkan ke tanah menjadikan kandungan air tanah dasar menjadi meningkat yang berakibat pada penurunan nilai CBR. Untuk tidak merubah nilai CBR dikenal bahan *geotekstil impermeable* yang akan menghambat meresapnya air ke tanah dasar.

Dalam menentukan tebal perkerasan jalan lentur digunakan metode analisa komponen berdasarkan buku petunjuk perencanaan tebal perkerasan lentur jalan raya dengan kode SKBI 6 2.3.26.1987 : UDC : 625.73(02)². Petunjuk ini dapat digunakan untuk merancang perkerasan jalan dengan menggunakan *porous asphalt*. Dengan modifikasi pada nilai CBR, dapat dihitung tebal perkerasan.

Dian Indah Purmana Sari (Dian, 2007) telah merancang alat ukur untuk mengetahui *technical properties* dari *permeable pavement* dengan perkerasan *paving block* lolos air tipe *grassblock* yang meliputi kapasitas infiltrasi dan daya dukungnya, menentukan perhitungan pengambilan dan pengolahan data dari alat tersebut sehingga bisa didapatkan ukuran kapasitas infiltrasi melalui grafik Horton dan koefisien limpasan metode Rasional serta mengukur perubahan daya dukung *permeable pavement* sebelum dan sesudah terjadi infiltrasi. Namun penelitian ini masih terdapat banyak kekurangan. Prosedur penelitian dan alat-alat yang digunakan dalam pengukuran merupakan skala pilot untuk melakukan penelitian selanjutnya.

Penelitian mengenai pemasangan *pervious concrete* untuk jalan lingkungan belum pernah dilakukan di Indonesia. Sedangkan penelitian Dian (Dian, 2007) hanya dapat mengukur tingkat dan kapasitas infiltasi dari jalan *permeable* menggunakan *paving block* tipe *grassblock*. Dalam pembuatan jalan *permeable*, yang menjadi tantangan adalah tanah dasar yang menjadi basah oleh air akan menyebabkan perubahan pada daya dukungnya. Oleh karena itu, berdasarkan penelitian yang telah dilakukan oleh Dian (Dian, 2007) dan peraturan

² Lampiran nomor 12 Keputusan Menteri Pekerjaan Umum Nomor 378/KPTS/1987 Tanggal 31 Agustus 1987.

mengenai jalan lentur, pengetahuan mengenai stabilisasi tanah dasar serta hasil penelitian bahan perkerasan *pervious concrete* penelitian ini akan dilakukan untuk menjawab tantangan mengenai aplikasi *permeable pavement* yang ada di Indonesia khususnya *pervious concrete*.

I.2. TUJUAN PENELITIAN

Tujuan penelitian ini adalah mengukur *technical properties* dari *permeable pavement* dengan bahan *pervious concrete* dan *porous asphalt* yang *mix design*-nya adalah hasil penelitian Laboratorium Bahan Departemen Teknik Sipil FTUI untuk diterapkan sebagai *pavement* di jalan lingkungan. Metode pengukuran dan pengolahan data berdasarkan penelitian yang telah dilakukan oleh Dian Indah Purnama Sari. *Technical properties* yang akan diukur antara lain :

1. Mengukur tingkat dan kapasitas infiltrasi melalui grafik Horton dan koefisien limpasan metode Rasional dari kedua bahan *permeable pavement* tersebut;
2. Mengukur nilai CBR sebelum terjadi infiltrasi dan setelah terjadi infiltrasi pada *permeable pavement* untuk menyimpulkan kelayakan penggunaan *permeable pavement* untuk kelas jalan lingkungan.
3. Mengevaluasi model fisik dan alat instalasi yang digunakan dalam pengukuran infiltrasi dan pengujian tanah dasar.

I.3. BATASAN DAN RUANG LINGKUP PENELITIAN

Pembahasan penelitian ini dibatasi hanya dibatasi pada aplikasi dari *Low Impact Development* untuk jalan lingkungan dengan menggunakan bahan-bahan yang terdapat di Indonesia. Adapun hal yang akan dilakukan diantaranya:

- a. Data yang diperoleh merupakan data primer dan sekunder
Data primer berupa hasil data pengamatan atau pengujian, baik di lapangan maupun di laboratorium, sedangkan data sekunder berupa spesifikasi material dari produsen /pabrik;
- b. Penelitian dilakukan dengan mengamati model fisik *permeable pavement* untuk kelas jalan lingkungan. Model dibuat di lahan parkir belakang gedung PAF (Pusat Administrasi Fakultas) FTUI dengan hasil uji

mekanika tanah untuk karakteristik tanah dasar, seperti *grainsize* dengan *hydrometer* dan *sieve analysis*, *specific gravity*, *compaction*, dan CBR laboratorium telah diukur pada penelitian Dian Indah Purnama Sari (Dian, 2008) dianggap sama karena lokasi penelitian ini sama dengan hasil penelitian tersebut.

- c. Material *pavement* yang digunakan adalah *pervious concrete* hasil penelitian Roy Immanuel (2008) yang memiliki kekuatan maksimum 130 kg/cm^2 .
- d. Struktur lapisan perkerasan dihitung berdasarkan buku petunjuk perencanaan tebal perkerasan lentur jalan raya dengan kode SKBI 0 2.3.26.1987 ; UDC : 625.73(02) yang dimodifikasi untuk perkerasan lolos air.
- e. Model untuk perkerasan ini adalah *scale model* dengan ukuran $3 \times 1 \text{ m}$.

I.4. METODOLOGI PENELITIAN

Tahapan-tahapan yang akan dilaksanakan pada penelitian ini adalah:

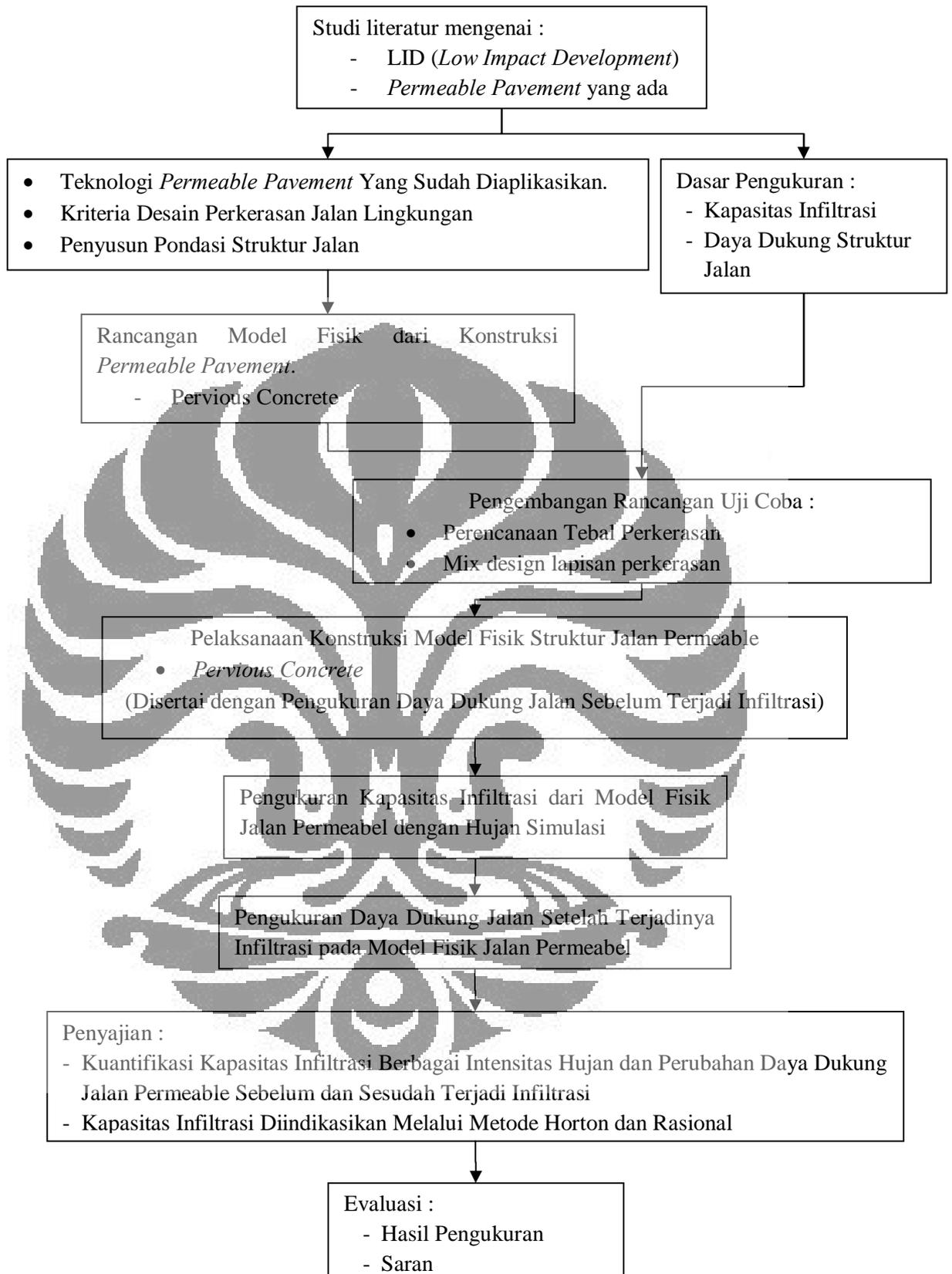
1. Studi literatur, yaitu mempelajari teori-teori yang berhubungan dengan penelitian beserta riset-riset yang berhubungan dengan penelitian.
2. Menetapkan model rancangan yang sesuai untuk penerapan *permeable pavement* dengan membuat model fisik ukuran $3 \text{ m} \times 1 \text{ m}$.
3. Mempersiapkan metode pengukuran daya infiltrasi dan daya dukung tanah
4. Mempersiapkan alat untuk pengukuran daya infiltrasi dan daya dukung tanah dasar pada lokasi model fisik yang dibuat.
5. Pelaksanaan konstruksi model fisik.
6. Melakukan pengujian untuk mengetahui daya infiltrasi pada model fisik yang dibuat dengan menggunakan hujan buatan dan hujan alami jika memungkinkan
7. Melakukan pengujian untuk mengetahui daya dukung tanah dasar dan *permeable pavement* setelah terjadi hujan (kondisi soaked).
8. Mengolah dan menganalisa data hasil percobaan.
9. Mengambil kesimpulan dari penelitian.

Pengujian yang akan dilakukan dalam penelitian ini di laboratorium dan di lapangan adalah sebagai berikut:

1. Melakukan *mix design* untuk *pervious concrete* sebagai lapisan permukaan perkerasan jalan pada sampel.
2. Melakukan perancangan terhadap tebal lapisan perkerasan dari lapis permukaan *pervious concrete* sebelum dilakukan konstruksi model fisik.
3. uji CBR lapangan dengan bantuan *Mechanical Jack* di lapangan untuk mengetahui nilai CBR lapisan tanah dasar dan lapisan-lapisan material penyusun pondasi saat pelaksanaan konstruksi tepatnya setelah proses pemadatan untuk mengetahui kesesuaian dengan desain rencana dan setelah terjadinya infiltrasi pada model fisik jalan permeabel tersebut untuk mengetahui perubahan penurunan daya dukungnya;
4. Mengukur *Infiltration Rate* dengan metode Horton dan Rasional untuk mengetahui kapasitas infiltrasi dan koefisien limpasan dari model fisik konstruksi jalan *permeable pavement*.

Adapun, sistematika penelitian dapat dilihat pada bagan berikut ini:





Gambar 1.1. Metodologi Penelitian

I.5. SISTEMATIKA PENULISAN

Sistematika penulisan seminar ini adalah sebagai berikut:

BAB I PENDAHULUAN

Berisi pendahuluan yang terdiri dari latar belakang, rumusan masalah, tujuan penelitian, batasan dan ruang lingkup penelitian serta sistematika penulisan.

BAB II TINJAUAN PUSTAKA

Berisikan landasan atau dasar-dasar teori yang merupakan elaborasi dari perumusan masalah dan cara penyelesaian masalah yang berkaitan dengan penelitian yang akan dilakukan untuk penyusunan skripsi ini. Teori-teori tersebut didapatkan dengan melakukan studi-studi literatur, baik melalui studi pustaka atau pun melalui internet.

BAB III RANCANGAN PENELITIAN

Bab ini berisikan diagram alir penelitian, peralatan, bahan, prosedur penelitian, perencanaan dan pertimbangan serta perhitungan dalam menentukan desain baru dari *Permeable Pavement* yang merupakan modifikasi dari beberapa desain yang telah dibuat sebelumnya di negara luar dengan pertimbangan kondisi eksisting dan bahan / material lokal yang ada di Indonesia.

BAB IV KONSTRUKSI MODEL FISIK DAN PERCOBAAN DAYA DUKUNG TANAH DAN INFILTRASI

Bab ini berisikan tahap-tahap pelaksanaan konstruksi model fisik dari jalan permeable, instalasi perlengkapan dan alat ukur, pengukuran daya dukung tanah dasar dan laju infiltrasi serta pengolahan data dan analisa dari percobaan yang telah dilaksanakan.

BAB V KESIMPULAN DAN SARAN

Bab ini berisikan kesimpulan secara keseluruhan dari penulisan skripsi ini serta saran-saran yang diperlukan untuk penyempurnaan tulisan ini.

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

II.1. LID SEBAGAI KONSEP PENGENDALIAN LIMPASAN HUJAN

Low Impact Development (LID) adalah pengembangan kawasan yang mempertimbangkan unsur lingkungan dalam setiap langkah pada perencanaan, desain dan konstruksi. Tujuan dari LID adalah untuk mengeliminasi dan meminimalkan pengaruh dari urbanisasi terhadap sistem alami air. Intinya, keadaan sistem alami air sebelum dan sesudah pembangunan tidak berubah terlalu banyak.

LID hadir sebagai pendekatan yang efektif dan menarik untuk mengontrol kualitas air hujan dan melindungi perkembangan DAS-DAS bagi masyarakat kota di seluruh wilayah. LID adalah suatu konsep menyeluruh dengan pendekatan yang berlandaskan teknologi (*technology-based approach*) untuk mengelola air hujan di suatu daerah perkotaan dalam skala mikro dan hemat biaya. Konsep kontrol sumber (*source control*) yang dimiliki LID cukup berbeda dengan metode pengelolaan hujan konvensional. Di samping itu, vegetasi lahan yang dikombinasikan dengan media filter, tidak hanya dapat mengontrol kuantitas air yang berlebih, tetapi juga kualitas air karena dapat mengurangi kandungan bakteri, logam, dan nutrisi dari limpasan air permukaan (*surface runoff*).

LID sebagai pengontrol limpasan memiliki beberapa tujuan, yaitu mengurangi gangguan/dampak dari limpasan hujan, menjaga dan menciptakan kembali keutamaan dari kondisi alam yang masih natural, mengurangi lahan kedap air secara efektif, memperbaiki keseimbangan hidrologi akibat terputusnya siklus hidrologi, meningkatkan fungsi tampungan sementara dan memudahkan terjadinya infiltrasi dan detensi sebagai konservasi air tanah.

Strategi LID sudah banyak diterapkan di berbagai wilayah di dunia. Ada beberapa LID yang umum diterapkan diantaranya adalah :

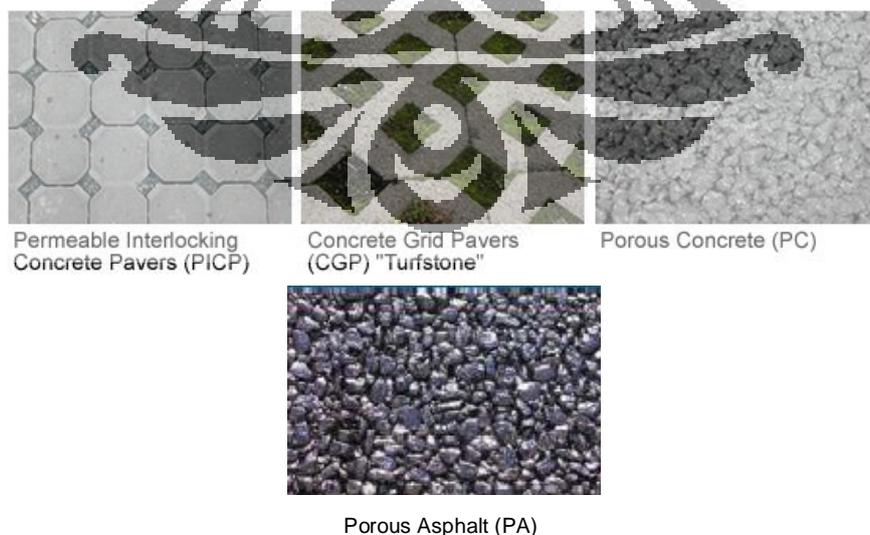
- a. *bioretention* dan *rain garden* sebagai lahan atau taman penampung hujan;
- b. *rain barrel* dan *cisterns* sebagai tabung penampung hujan;
- c. *permeable pavement* yaitu perkerasan jalan permeabel;
- d. *green roofs* dengan penghijauan di atap;
- e. *retention ponds* yaitu danau-danau retensi air;

- f. *filter strip* yaitu sebidang jalan yang dapat memfilter air;
- g. *vegetated swale* yaitu saluran pelimpas yang bervegetasi; dan lain-lain.

Teknologi yang dapat mendukung konsep LID (*Low Impact Development*) dikenal sebagai teknologi BMP (*Best Management Practice*). Teknologi BMP (*Best Management Practice*) sebagai pendukung konsep LID (*Low Impact Development*) terdiri dari berbagai teknologi aplikasi struktural yang digunakan untuk mengurangi dampak-dampak dari limpasan permukaan (*surface runoff*) yang terjadi akibat pembangunan kota, baik kuantitas maupun kualitas dari limpasan tersebut. Teknologi BMP didesain untuk mengurangi volume limpasan dan debit puncak melalui proses-proses hidrologi seperti evapotranspirasi, infiltrasi, detensi (*detention*), dan filtrasi.

Permeable pavement merupakan salah satu dari teknologi BMP dari LID. Beberapa manfaat dari penerapan aplikasi ini diantaranya sebagai berikut:

- a. mengurangi limpasan air hujan dari lokasi karena infiltrasi air;
- b. mengurangi frekuensi banjir;
- c. mengisi kembali air tanah untuk konservasi;
- d. meningkatkan kualitas air karena mengurangi kadar polutan, seperti kandungan zat nitrogen, bakteri dan fosfor yang dihasilkan, logam, BOD, dan amonium;
- e. mengurangi daerah kedap air;
- f. mengurangi Total Suspended Soil (TSS) nitrit, nitrat, fosfat;
- g. mengurangi kebutuhan saluran air dan sistem penahan air hujan; dan
- h. mengurangi suhu air limpasan.



Gambar 2.1. Berbagai macam Contoh Permeable Pavement

Sumber : Courtesy of NC State University – Biological and Agricultural Engineering Department. Sumber Porous Asphalt : www.unh.edu/erg/cstev

II.2. PERKERASAN JALAN LENTUR

Jalan sebagai salah satu prasarana perhubungan darat, mengikat semua kota dalam hubungan hirarki dan membentuk sistem jaringan tertentu dalam satuan wilayah pengembangan.

UU RI No. 13 / 1980 mengenai jalan, pengertian tentang jalan adalah prasarana perhubungan darat dalam bentuk apapun, meliputi segala bagian jalan terbentuk bangunan pelengkap dan perlengkapannya yang diperuntukkan bagi lalu lintas. UU RI No. 13 / 1988 ada 2 kategori :

- a. Jalan umum adalah jalan yang diperuntukkan bagi lalu lintas umum.
- b. Jalan khusus adalah jalan yang tidak diperuntukkan bagi lalu lintas umum, antara lain jalan inspeksi pengairan, saluran minyak/gas, pertambangan, perkebunan, jalan kompleks.

Jalan lingkungan adalah jalan yang berada dalam lingkungan kawasan perumahan. Dimensi dan luas jalan mengacu pada standar Dinas Kimpraswilhub dengan jenis material penutup berupa *paving block*, atau aspal penetrasi, atau aspal *sand sheet*.³

Dalam upaya memenuhi kebutuhan berlalu lintas dari suatu tempat ke tempat lain secara aman dan nyaman diperlukan konstruksi perkerasan jalan. Konstruksi perkerasan jalan memiliki variasi fisik maupun struktural tergantung dari fungsi jalan tersebut. Berdasarkan bahan pengikatnya konstruksi jalan dapat dibedakan menjadi :

- a. Konstruksi perkerasan lentur (*flexible pavement*), yaitu perkerasan yang menggunakan aspal sebagai bahan pengikat. Lapisan-lapisan perkerasannya bersifat memikul dan menyebarkan beban lalu lintas ke tanah dasar.
- b. Konstruksi perkerasan kaku (*rigid pavement*), yaitu perkerasan yang menggunakan beton sebagai material perkerasan. Plat beton dengan atau tanpa tulangan diletakkan di atas tanah dasar dengan atau tanpa lapis pondasi bawah. Beban lalu lintas sebagian besar dipikul oleh beton.

Untuk dapat memberikan rasa aman dan nyaman kepada pengguna jalan, maka konstruksi perkerasan jalan harus memenuhi persyaratan struktural.

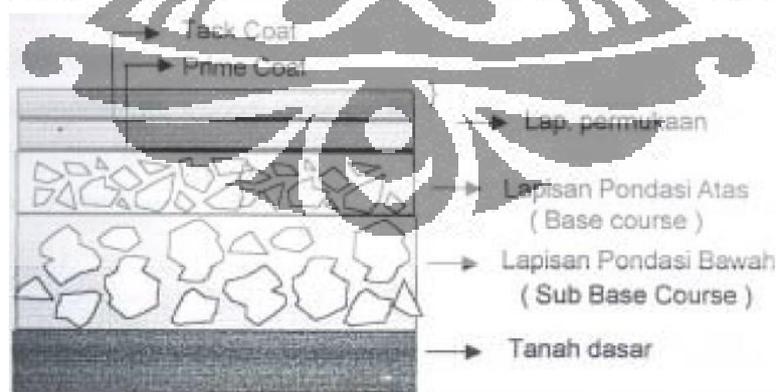
³ www.rumahjogja.com

Konstruksi perkerasan jalan dipandang dari segi kemampuan struktural haruslah memenuhi persyaratan berikut:

- 1) Permukaan cukup rata, tidak bergelombang dan tidak melendut.
- 2) Permukaan cukup kaku, sehingga tidak mudah berubah bentuk akibat beban yang bekerja di atasnya.
- 3) Ketebalan yang cukup sehingga mampu menyebarkan beban/muatan lalu lintas ke tanah dasar.
- 4) Permukaan mudah mengalirkan air, sehingga air hujan yang jatuh dapat dengan cepat dialirkan.

Konstruksi perkerasan lentur merupakan lapisan yang bersifat elastis jika menerima beban, sehingga dapat memberi kenyamanan bagi pengguna jalan. Pada konstruksi ini seluruh lapisan ikut menahan beban. Lapisan-lapisan tersebut berfungsi untuk menerima beban lalu lintas dan menyebarkan ke lapisan bawahnya. Konstruksi perkerasan lentur terdiri dari:

- 1) Lapisan permukaan (*surface course*)
- 2) Lapisan pondasi (*base course*)
 - a. Lapisan pondasi atas (*base course*)
 - b. Lapisan pondasi bawah (*subbase course*)
- 3) Lapisan tanah dasar (*subgrade*)



Gambar 2.2. Lapisan Pondasi Perkerasan Jalan Lentur

- 1) Lapisan permukaan (*surface course*)

Lapisan permukaan (*surface course*) adalah lapisan permukaan jalan yang langsung menerima beban kendaraan. Material untuk *surface course*, ada beberapa macam, yaitu :

- a) Aspal macadam (aspal penetrasi)
- b) Campuran Aspal emulsi (*aspal cold mix*)
- c) Campuran Aspal beton (*aspal hotmix*)

Kedua jenis yang terakhir dapat mempunyai kekuatan struktur.

2) Lapisan Pondasi (*base course*)

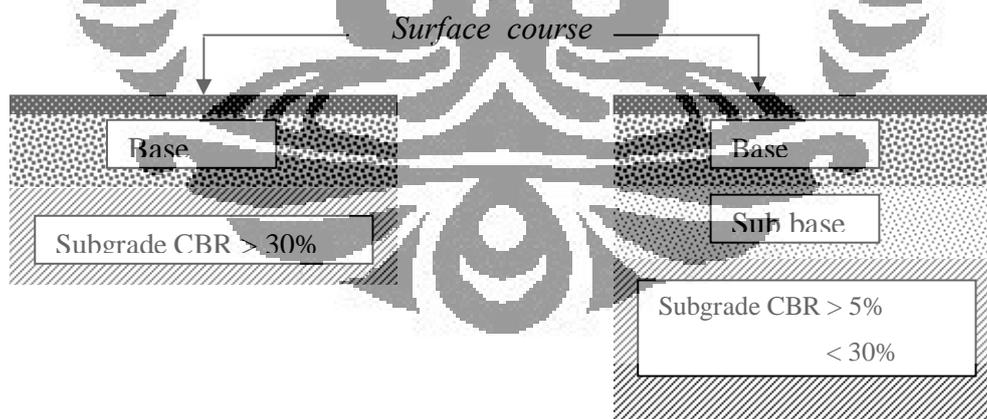
Lapisan pondasi (*base course*) adalah fondasi jalan. Adakalanya *base course* dibagi menjadi 2 (dua) lapis, yaitu :

- a. *Subbase* (pondasi bawah), biasanya material granular
- b. *Base* (pondasi atas), biasanya beton atau aspal beton

Material untuk *base*, ada beberapa macam, yaitu :

- a) Korala alam / sirtu yang stabil (mengandung butir halus yang cukup)
- b) Batu pecah, hasil *crushing plant*
- c) Stabilisasi tanah dengan semen / kapur.
- d) *Cement treated base* (CTB)
- e) Aspal beton (*asphalt treated base*)

Dua kondisi *subgrade* yang berkaitan dengan *subbase* dapat ditunjukkan dengan gambar dibawah ini.



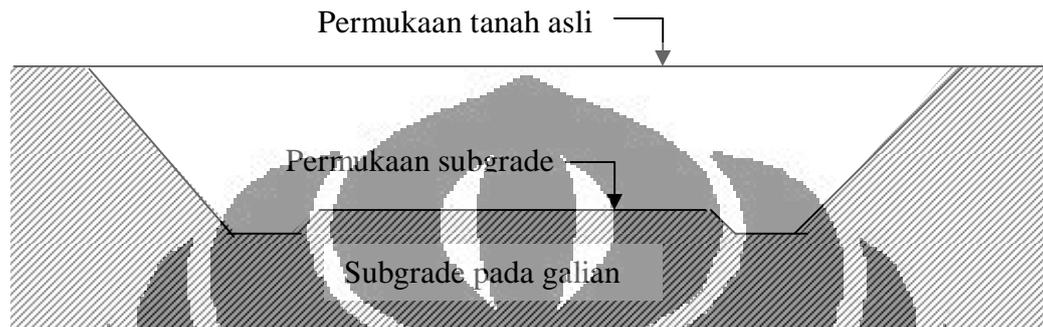
Gambar 2.3. Kondisi Perkerasan Lentur Berkaitan dengan Lapisan Pondasi

3) Lapisan tanah dasar (subgrade)

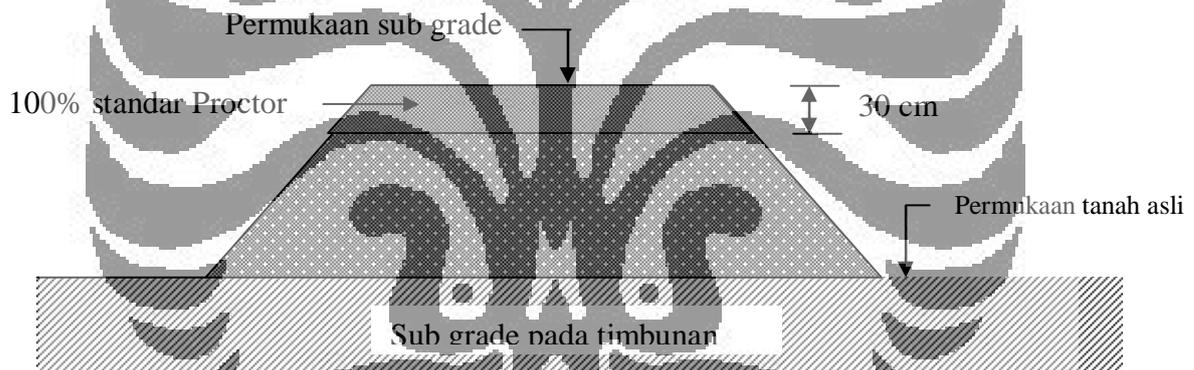
Subgrade adalah tanah dasar. Untuk badan jalan yang terletak pada daerah galian, maka *subgradenya* adalah dasar galian tersebut. Sedang badan jalan yang

terletak pada daerah timbunan, maka permukaan timbunan tersebut berfungsi sebagai subgrade. Subgrade, disyaratkan mempunyai $CBR > 5\%$, dan bila $CBR_{subgrade}$ yang ada $> 30\%$, maka subgrade mampu berfungsi sebagai *subbase*.

Untuk badan jalan yang terletak pada daerah timbunan, memiliki persyaratan standar proctor sebesar 95 % dan pada permukaan setebal 30 cm dipersyaratkan kepadatan 100 % standar proctor. (lihat gambar dibawah ini).



Gambar 2.4. Kondisi Subgrade pada Galian



Gambar 2.5. Kondisi Subgrade pada Timbunan

Dalam menentukan tebal perkerasan jalan permeable digunakan metode analisa komponen berdasarkan buku petunjuk perencanaan tebal perkerasan lentur jalan raya dengan kode SKBI 6 2.3.26.1987 ; UDC : 625.73(02).⁴ Penentuan tebal perkerasan ini hanya berlaku untuk konstruksi perkerasan yang menggunakan material berbutir, (granular material, batu pecah) dan tidak berlaku untuk konstruksi perkerasan yang menggunakan batu-batu besar (cara Telford atau Pak laag). Hal-hal yang mempengaruhi tebal perkerasan adalah Lalu lintas, Daya dukung tanah dasar, Faktor regional, Indeks Permukaan, Koefisien kekuatan relatif, dan Batas-batas minimum Tebal Lapisan Perkerasan.

⁴ Lampiran nomor 12 Keputusan Menteri Pekerjaan Umum Nomor 378/KPTS/1987 Tanggal 31 Agustus 1987.

Perhitungan pertama adalah menentukan laju harian rata-rata lalu lintas di awal, tengah dan akhir perencanaan jalan. Parameter yang digunakan diantaranya koefisien distribusi kendaraan (C), angka ekivalen (E) dan besar LHR (Lalu lintas Harian Rata-rata).

Tabel 2.1. Distribusi Kendaraan (c) untuk kendaraan ringan dan berat yang lewat pada Lajur rencana.⁵

Jumlah Lajur	Kendaraan Ringan*)		Kendaraan Berat**)	
	1 arah	2 arah	1 arah	2 arah
1 lajur	1,00	1,00	1,00	1,00
2 lajur	0,60	0,50	0,70	0,50
3 lajur	0,40	0,40	0,50	0,475
4 lajur	-	0,30	-	0,45
5 lajur	-	0,25	-	0,425
6 lajur	-	0,20	-	0,40

*) Berat total < 5 ton, misalnya mobil penumpang, pick up, mobil hantaran

**) Berat total > 5 ton, misalnya bus, truk, semi trailer, trailer

Angka ekivalen (E) masing-masing golongan sumbu didapat dengan perumusan

$$E = \frac{(\text{beban.satu.sumbu.tunggal.dalam.kg})^4}{8160} \quad (2.1)$$

$$E = 0,086 \frac{(\text{beban.satu.sumbu.ganda.dalam.kg})^4}{8160} \quad (2.2)$$

atau dapat pula menggunakan Angka Ekivalen (E) beban sumbu kendaraan yang telah terjadi dalam bentuk tabel.

⁵ Berdasarkan SKBI 2.3.26.1987/SNI 03-1732-1989

Tabel 2.2. Angka ekivalen (E) beban sumbu kendaraan⁶

Beban Satu Sumbu		Angka Ekivalen	
Kg	Lbs	Sumbu Tunggal	Sumbu Ganda
1000	2205	0,0002	-
2000	4409	0,0036	0,0003
3000	6614	0,0183	0,0016
4000	8818	0,0577	0,0050
5000	11023	0,1410	0,0121
6000	13228	0,2923	0,0251
7000	15432	0,5415	0,0466
8000	17637	0,9238	0,0794
8160	18000	1,0000	0,0860
9000	19841	1,4798	0,1273
10000	22046	2,2555	0,1940
11000	24251	3,3022	0,2840
12000	26455	4,6770	0,4022
13000	28660	6,4419	0,5540
14000	30864	8,6647	0,7452
15000	33069	11,4148	0,9820
16000	35276	14,7815	1,2712

Dalam perhitungan LEP (Lintas Ekivalen Permulaan), digunakan rumus

$$LEP = \sum_{j=1}^n LHR_j \times C_j \times E_j \quad (2.3)$$

Dalam perhitungan LEA (Lintas Ekivalen Akhir), digunakan rumus

$$LEA = \sum_{j=1}^n LHR_j (1+i)^{UR} \times C_j \times E_j \quad (2.4)$$

Dalam perhitungan LET (Lintas Ekivalen Tengah), digunakan rumus

$$LET = \frac{LEP + LEA}{2} \quad (2.5)$$

⁶ Berdasarkan SKBI 2.3.26.1987 / SNI 03-1732-1989

Tabel 2.3. Batas-batas minimum tebal lapisan perkerasan⁷

ITP	Tebal Minimum (cm)	Bahan
1. Lapis Permukaan		
< 3,00	5	Lapis pelindung : (BURAS/BURTU/BURDA)
3,00 ó 6,70	5	LAPEN/Aspal/Macadam, HRA, LASBUTAG, LASTON
6,71 ó 7,49	7,5	LAPEN/Aspal/Macadam, HRA, LASBUTAG, LASTON
7,50 ó 9,99	7,5	LASBUTAG
× 10	10	LASTON
2. Lapis Pondasi Atas		
< 3,00	15	Batu pecah, stabilisasi tanah dengan semen, stabilisasi dengan kapur
3,00 ó 7,49	20*)	Batu pecah, stabilisasi tanah dengan semen, stabilisasi dengan kapur
7,50 ó 9,99	10	LASTON atas
	20	Batu pecah, stabilisasi tanah dengan semen, stabilisasi dengan kapur
10 ó 12,14	15	LASTON atas
	20	Batu pecah, stabilisasi tanah dengan semen, stabilisasi dengan kapur
× 12,25	25	Batu pecah, stabilisasi tanah dengan semen, stabilisasi dengan kapur, pondasi macadam, Lapen, Laston atas
*) batas 20 cm tersebut dapat diturunkan menjadi 15 cm bila untuk pondasi bawah digunakan material berbutir kasar.		
3. Lapis Pondasi Bawah		
Untuk setiap nilai ITP bila digunakan pondasi bawah, tebal minimum adalah 10 cm.		

Perhitungan selanjutnya adalah LER (Lintas Ekuivalen Rencana) dengan rumus

$$LER = LET \times FP \quad (2.6a)$$

⁷ Berdasarkan SKBI 2.3.26.1987 / SNI 03-1732-1989

$$FP = \frac{UR}{10} \quad (2.6b)$$

Untuk menentukan ITP (Indeks Tebal Perkerasan), diperlukan data-data seperti targetan CBR tanah dasar dalam persen (%) dan jenis perkerasan untuk mengetahui nilai Ipo-nya. Selanjutnya adalah penetapan nilai Ipt yang menyatakan kondisi permukaan jalan. Dengan data-data tersebut dapat diketahui jenis nomogram yang akan digunakan untuk perhitungan.

Tabel 2.4. Indeks permukaan pada akhir umur rencana (Ipt)⁸

LER ⁹	Klasifikasi Jalan			
	Lokal	Kolektor	Arteri	Tol
< 10	1,0 ó 1,5	1,5	1,5 ó 2,0	-
10 ó 100	1,5	1,5 ó 2,0	2,0	-
100 ó 1000	1,5 ó 2,0	2,0	2,0 ó 2,5	-
> 1000	-	2,0 ó 2,5	2,5	2,5

Catatan : Pada proyek-proyek penunjuang jalan, JAPAT/Jalan Murah, atau jalan darurat maka Ipt dapat diambil 1,0.

Ipt = 1,0	menyatakan permukaan jalan dalam keadaan rusak berat sehingga sangat mengganggu lalu lintas kendaraan
Ipt = 1,5	adalah tingkat pelayanan terendah yang masih mungkin (jalan tidak terputus)
Ipt = 2,0	adalah tingkat pelayanan terendah bagi jalan yang masih mantap
Ipt = 2,5	menyatakan permukaan jalan masih cukup stabil dan baik

⁸ Berdasarkan SKBI 2.3.26.1987 / SNI 03-1732-1989

⁹ LER dalam satuan angka ekivalen 8,16 ton beban sumbu tunggal

Tabel 2.5. Indeks permukaan pada awal usia rencana (Ipo)¹⁰

Jenis Lapisan Perkerasan	Ipo	Roughness (mm/km)
LASTON	× 4	Ö 1000
	3,9 ó 3,5	> 1000
LASBUTAG	3,9 ó 3,5	Ö 2000
	3,4 ó 3,0	> 2000
HRA	3,9 ó 3,5	Ö 2000
	3,4 ó 3,0	> 2000
BURDA	3,9 ó 3,5	< 2000
BURTU	3,4 ó 3,0	< 2000
LAPEN	3,4 ó 3,0	Ö 3000
	2,9 ó 2,5	> 3000
LATASBUM	2,9 ó 2,5	-
BURAS	2,9 ó 2,5	-
LATASIR	2,9 ó 2,5	-
JALAN TANAH	Ö 2,4	-
JALAN KERIKIL	Ö 2,4	-

Catatan : Alat pengukur roughness yang dipakai adalah roughness NAASRA, yang dipasang pada kendaraan standar Datsun 1500 station wagon, dengan kecepatan kendaraan ± 32 km/jam. Gerakan sumbu belakang dalam arah vertikal dipindahkan pada alat roughometer melalui kabel yang dipasang di tengah-tengah sumbu belakang kendaraan, yang selanjutnya dipindahkan kepada counter melalui "flexible drive". Setiap putaran counter adalah sama dengan 15,2 mm gerakan vertikal antara sumbu belakang dan badan kendaraan. Alat pengukur roughness tipe lain dapat digunakan dengan mengkalibrasikan hasil yang diperoleh terhadap roughometer NAASRA.

¹⁰ Berdasarkan SKBI 2.3.26.1987 / SNI 03-1732-1989

Tabel 2.6. Koefisien kekuatan relatif (a)¹¹

Koefisien Kekuatan Relatif			Kekuatan Bahan			Jenis Bahan
a1	a2	a3	MS (kg)	Kt (kg/cm)	CBR (%)	
0,40	-	-	744	-	-	LASTON
0,35	-	-	590	-	-	
0,32	-	-	454	-	-	
0,30	-	-	340	-	-	
0,35	-	-	744	-	-	LASBUTAG
0,31	-	-	590	-	-	
0,28	-	-	454	-	-	
0,26	-	-	340	-	-	
0,30	-	-	340	-	-	HRA
0,26	-	-	340	-	-	ASPAL MACADAM
0,25	-	-	-	-	-	LAPEN (mekanis)
0,20	-	-	-	-	-	LAPEN (manual)
-	0,28	-	590	-	-	LASTON atas
-	0,26	-	454	-	-	
-	0,24	-	340	-	-	
-	0,23	-	-	-	-	LAPEN (mekanis)
-	0,19	-	-	-	-	LAPEN (manual)
-	0,15	-	-	22	-	Stabilitas tanah
-	0,13	-	-	18	-	dengan semen
-	0,15	-	-	22	-	Stabilitas tanah
-	0,13	-	-	18	-	dengan kapur
-	0,14	-	-	-	100	Batu Pecah (kelas A)
-	0,13	-	-	-	80	Batu Pecah (kelas B)
-	0,12	-	-	-	60	Batu Pecah (kelas C)
-	-	0,13	-	-	70	SIRTU / Pitrun (kelas A)
-	-	0,12	-	-	50	SIRTU / Pitrun (kelas B)
-	-	0,11	-	-	30	SIRTU / Pitrun (kelas C)
-	-	0,10	-	-	20	Tanah / Lempung Kepasiran

Catatan :

¹¹ Berdasarkan SKBI 2.3.26.1987 / SNI 03-1732-1989

- Kuat tekan stabilisasi tanah dengan semen diperiksa pada hari ke-7.
- Kuat tekan stabilisasi tanah dengan semen kapur diperiksa pada hari ke-21.

Keterangan : MS (Marshall Test), Kt (Kuat tekan)

dari : SKBI 2.3.26.1987 / SNI 03-1732-1989

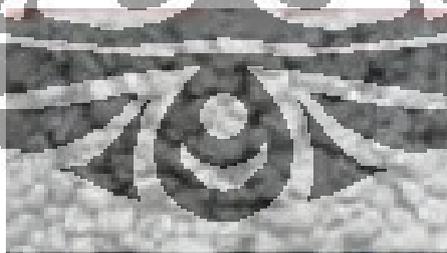
Dengan demikian, didapat perhitungan

$$ITP = a_1.D_1 + a_2.D_2 + a_3.D_3 \quad (2.7)$$

dengan urutan dari lapisan terbawah sampai teratas.

II.3. PERKERASAN JALAN LENTUR MENGGUNAKAN PERMUKAAN *PERVIOUS CONCRETE*

Pada awalnya, biaya pembuatan jalan dengan menggunakan *pervious concrete* lebih tinggi dibandingkan dengan menggunakan beton dan aspal pada biasanya. Tapi total biaya yang sesungguhnya, termasuk setelah pemasangan menjadi lebih murah. Harga dari material dalam pembuatan *pervious concrete* lebih mahal disebabkan oleh pembangunannya yang lebih tebal dibandingkan beton biasa. Alasannya yaitu karena pada *pervious concrete* air akan meresap dan memenuhi *subgrade* yang berada di dasar tanah. Jadi kita harus membuat 4 inchi dengan menggunakan beton biasa maka kita membutuhkan 6 inchi untuk *pervious concrete*. Tetapi jika ditotal dengan biaya pemasangan dan keawetannya, maka *pervious concrete* lebih unggul.



Gambar 2.6. Contoh Pervious Concrete

II.3.1. Keuntungan *Pervious concrete*

Berikut keunggulan *pervious concrete* dari segi ekonomi :

- Menghemat biaya pembangunan

Menurut Badan Perlindungan Batas Air (*Center for Watershed Protection*), pembangunan saluran penampungan air yang tradisional dapat memakan biaya

yang besar. Dengan penggunaan *pervious concrete*, maka saluran drainase yang diperlukan semakin kecil. Yang akhirnya mengurangi biaya. Syarat sebuah jalan yaitu adanya kelandaian untuk mengalirkan air, namun pada *pervious concrete* hal itu tidak dibutuhkan.

- Meningkatkan kegunaan sistem pembuangan kelebihan air yang ada
Penggunaan *pervious concrete* dapat mengurangi permintaan untuk meningkatkan ukuran dan sistem pembuangan air yang sudah ada yang diakibatkan dan adanya pembangunan dan area perumahan yang baru atau area bangunan komersil yang baru.
- Meningkatkan nilai guna sebuah area
Karena *pervious concrete* berperan sebagai sarana tadah hujan, maka tidak diperlukan lagi tambahan area untuk membangun tempat penyimpanan/penampungan air yang besar. Itu artinya, developer dan pemilik properti dapat menggunakan areanya menjadi lebih efektif dan efisien hingga akhirnya memaksimalkan profit dan investasi mereka.
- Menghemat biaya perawatan
Pervious concrete merupakan material yang dapat bertahan lama dalam jangka waktu yang lama dengan usia pemakaian yang relatif sama dengan beton biasa.

II.3.2. Bahan Pembentuk *Pervious Concrete*

Bahan pembentuk *pervious concrete* sama dengan bahan pembentuk beton. Perbedaannya terletak pada agregat yang digunakan. Beton merupakan material yang terdiri dari 3 jenis bahan baku yaitu : semen, agregat dan Air

II.3.2.1. Semen

Semen merupakan bahan hidrolis yang dapat bereaksi secara kimia dengan air, disebut hidrasi, sehingga membentuk material batu padat. Pada umumnya, semen untuk bahan bangunan adalah tipe semen Portland. Semen ini dibuat dengan cara menghaluskan silikat-silikat kalsium yang bersifat hidrolis dan dicampur bahan gips. Beberapa tipe semen yang diproduksi di Indonesia antara lain semen Portland tipe I, II, III, dan IV.

Semen tipe I dapat dikatakan yang paling banyak dimanfaatkan untuk bangunan, dan tidak memerlukan persyaratan-persyaratan khusus sebagaimana jenis lainnya.

Semen tipe II merupakan modifikasi semen tipe I dengan maksud untuk meningkatkan ketahanan terhadap sulfat dan menghasilkan panas hidrasi yang lebih rendah. Semen jenis ini terutama dimanfaatkan untuk bangunan yang terletak didaerah dengan tanah berkadar sulfat rendah.

Semen tipe III merupakan semen yang cepat mengeras. Beton yang dibuat dengan semen tipe III akan mengeras cukup cepat, dan kekuatan yang dicapainya dalam 24 jam akan sama dengan kekuatan beton dan semen biasa dalam 7 hari. Hanya sekitar 3 hari kekuatan tekannya setara dengan kekuatan tekan 28 hari beton dengan semen biasa.

Semen tipe V terutama ditujukan untuk memberikan perlindungan terhadap bahaya korosi akibat pengaruh air laut, air danau, air tambang, maupun pengaruh garam sulfat yang terdapat dalam air tanah. Semen tipe V ini memiliki daya resistansi terhadap sulfat yang lebih baik dibandingkan semen tipe II.

II.3.2.2. Agregat

Dalam SNI T 15-1991-03 agregat didefinisikan sebagai material granular, misalnya pasir, kerikil, batu pecah, dan kerak tungku besi yang dipakai bersama-sama dengan suatu media pengikat untuk membentuk beton semen hidrolis atau adukan. Berdasarkan ukurannya, agregat dapat dibedakan menjadi:

1. Agregat halus diameter $0 \hat{=} 5$ mm disebut pasir, yang dapat dibedakan lagi menjadi,
 - (a) pasir halus : diameter $0 \hat{=} 1$ mm
 - (b) pasir kasar: diameter $1 \hat{=} 5$ mm
2. Agregat kasar diameter >5 mm, biasanya berukuran $5 \hat{=} 40$ mm, disebut kerikil.

Agregat untuk beton harus memenuhi ketentuan dan Mutu dan Cara uji Agregat Beton dalam SNI 00452-80 ataupun persyaratan ASTM C330 tentang *Specification of Concrete Aggregate*. Agregat ringan merupakan agregat yang dalam keadaan kering dan gembur mempunyai berat 1100 kg/m^3 atau kurang.

Kekuatan beton dipengaruhi oleh kualitas agregat, proporsi campuran, serta kebersihan air dan agregatnya. Oleh karena itu, selain harus memiliki kekuatan dan daya tahan baik, butir agregat disyaratkan harus bersih dari lumpur atau material organik lainnya yang dapat mengurangi kekuatan beton. Diameter lumpur atau material organik

ml adalah kurang dan 0,063 mm. Bila banyaknya lumpur atau material organis yang dikandung dalam agregat lebih dan 1 % berat kering, agregat tersebut harus dicuci.

II.3.2.3. Air

Proporsi air yang sedikit akan memberikan kekuatan yang tinggi pada beton, tetapi kelemasan beton atau daya kerjanya akan berkurang. Sedangkan proporsi air yang agak besar akan memberikan kemudahan pada waktu pelaksanaan pengecoran, tetapi kekuatan beton jadi rendah. Proporsi air ini dinyatakan dalam rasio air-semen (water-cement ratio), yaitu angka yang menyatakan perbandingan antara berat air (kg) dibagi dengan berat semen (kg) dalam adukan beton tersebut.

Beton untuk konstruksi gedung biasanya memiliki nilai rasio air-semen sebesar 0,45 hingga 0,65. Dengan rasio tersebut dapat dihasilkan beton yang kedap air, namun mutu beton tetap dipengaruhi cara pemadatan dan daya kerja. Pemadatan yang kurang baik, akan menimbulkan sarang kerikil (honeycomb) yang mengakibatkan beton keropos. Daya kerja beton diukur dan nilai slump. Nilai slump beton untuk bangunan berkisar 7,5 hingga 15 cm.

Perlu diketahui bahwa air untuk campuran beton harus tidak mengandung minyak, larutan asam, garam alkali, material organik, maupun bahan-bahan lain yang dapat mengurangi kekuatan beton.

II.3.3. Pemanfaatan Geotekstil Untuk pemisah Antar Lapisan Pada Pembuatan Jalan Permeable

Bahan geotekstil merupakan produk buatan manusia dari bahan sintetik (polimer). Pemakaian geotekstil sudah meluas di seluruh dunia untuk menaikkan daya dukung tanah. Jenis geotekstil terdiri dari woven dan non-woven, dan grid. Properties dari geotekstil yang penting adalah sifat fisik, mekanis, hidrolis dan durabilitas. Sifat fisik dari geotekstil direpresentasikan ke dalam berat per satuan luas, ketebalan, *specific gravity*, *percent open area (POA)*, *equivalent opening size (EOS)*. Sifat mekanis berupa *Grab strenght*, *Grab elongation*, *Modulus secant*. Sifat hidrolis berupa permeabilitas searah bidang dan tegak lurus bidang. Sifat ketahanan (durabilitas) berupa ketahanan pH, biologis dan UV.

Fungsi geotekstil dalam konteks peningkatan daya dukung tanah adalah sebagai berikut:

- Sebagai separator, yaitu pemisah antara material satu dengan yang lain misalnya tanah sebagai *subgrade* terhadap batu sebagai *subbase* pada konstruksi jalan;
- Sebagai *reinforcement*, yaitu menambah kekuatan agar dapat menyebarkan gaya atau tekanan dari atas menjadi gaya tarik horizontal karena prinsip reinforcement dari geotekstil sama dengan tulangan pada beton;
- Sebagai filtrasi dan drainase yang menggantikan lapisan pasir atau ijuk yang biasa dipakai untuk filtrasi air tanah;
- Sebagai penahan erosi yang biasa ditahan dengan tumbuhan atau rumput.

Cakupan Aplikasi geotekstil meliputi jalan dengan perkerasan, jalan tanpa perkerasan / jalan masuk proyek / jalan perkebunan, lahan penumpukan peri kemas dan timbunan lain, lahan parkir, embankment ó embankment jalan, konstruksi jalan rel kereta api, pengembangan lahan industri dan hunian; serta reklamasi lahan.

II.3.4. Pembuatan Lapisan Kedap Air Dengan Stabilisasi Tanah Dasar

Karakteristik tanah dapat diperbaiki dalam banyak cara diantaranya termasuk kimiawi, thermal, mekanik, dan lain-lain. Haruslah disadari bahwa karena karakteristik tanah yang berbeda-beda pada setiap daerah, sehingga tidak satupun metode yang pernah berhasil dalam lebih dari sejumlah jenis tanah yang terbatas. Stabilisasi ditujukan untuk perbaikan karakteristik tanah. Daya dukung tanah ditunjukkan dengan nilai CBR. Jadi salah satu alasan dilakukan stabilisasi tanah adalah untuk meningkatkan nilai CBR dari tanah tersebut.

Secara umum stabilisasi tanah dapat dibagi menjadi tiga cara, yaitu:

- 1) Cara Mekanis, yaitu perbaikan tanah tanpa penambahan bahan lain, misalnya dengan pemadatan.
- 2) Cara fisik, yaitu dengan memanfaatkan perubahan-perubahan fisik yang terjadi, seperti hidrasi, absorbs (penyerapan air)
- 3) Cara Kimiawi, yaitu dengan memanfaatkan reaksi kimia yang akan mengakibatkan perubahan sifat tanah

Stabilisasi tanah dengan kapur merupakan stabilisasi tanah dengan cara kimiawi. Pada pencampuran kapur dengan tanah terjadi banyak proses kimia. Ada 3 jenis proses pada pencampuran kapur dengan tanah yang perlu diketahui, yaitu:

1) Penggantian Ion dan perubahan susunan.

Dengan pencampuran kapur pada tanah yang lembab dan kohesif setelah dibiarkan beberapa waktu, maka tanah tersebut akan menjadi tidak lengket, menjadi seperti pasir serta mudah dikerjakan. Fenomena ini terjadi karena disebabkan oleh 2 hal, yaitu pertama karena kation dari kapur menggeser ion dari sodium dan hidrogen yang lemah dari permukaan butir-butir tanah, kedua karena adanya penambahan kalsium kation yang memenuhi permukaan partikel tanah. Dua hal tersebut merubah secara fisik charge listrik pada permukaan tanah, karena ikatan dari tanah tersebut tergantung dari besar dan charge dari ionnya. Dengan adanya proses kimia ini maka tanah menjadi tidak lengket, menjadi seperti pasir.

2) Proses pengerasan

Kejadian ini disebabkan karena kalsium dan mineral yang ada dalam tanah, dengan pertolongan pozzolan membentuk unsur-unsur baru.

3) *Carbonation*

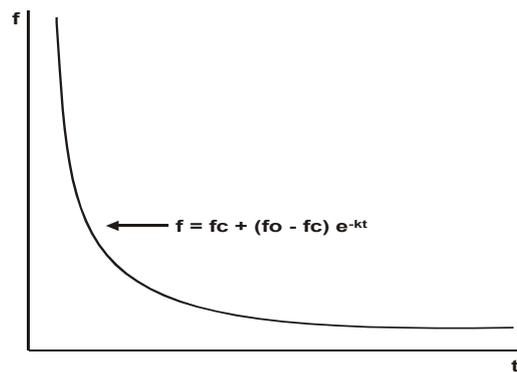
Ini adalah penyerapan karbon dioksida (CO_2) oleh kapur dari udara. Karbon dioksida dengan kalsium hidroksida akan menjadi kalsium karbonat. Jika proses ini terjadi pada kapur sebelum terjadi proses pencampuran tanah, maka pencampuran tanah tidak akan sempurna.

II.4. PENGUKURAN KAPASITAS INFILTRASI

Metode perhitungan *infiltration rate* untuk menentukan nilai *Curve Number* terdiri dari beberapa metode untuk menghitung laju infiltrasi pada suatu daerah yaitu antara lain :

II.4.1. Metode Horton

Untuk menghitung laju Infiltrasi dapat diilustrasikan berdasarkan persamaan empiris dari Horton (1939, dalam Schwab, G.O, and R.K. Frevert, 1981) seperti tercantum dalam Gambar di bawah ini



Gambar 2.7. Kurva Laju Infiltrasi
(Horton, 1939 dalam Schwab and Frevert, 1981)

Keterangan: f = laju infiltrasi pada t
 f_c = laju infiltrasi pada saat infiltrasi telah konstan
 f_o = laju infiltrasi awal
 t = waktu; k = konstanta, dan
 e = 2,718281820

Persamaan di atas hanya berlaku apabila intensitas hujan lebih besar dari pada laju infiltrasi saat bersamaan. Untuk intensitas hujan yang lebih kecil dari laju infiltrasi maka lengkung laju penurunannya berbeda. Pada metode ini kemampuan daya dukung tanah diperhitungkan sehingga tanah akan mencapai titik jenuh jika terus-menerus diberi air.

II.4.2. Metode NRCS

Ada banyak faktor yang saling menghubungkan antara pengaruh volume infiltrasi dan *rainfall excess*. Terminologi umum, ini adalah hubungan iklim dengan DAS. Infiltrasi dan *rainfall excess* akan berganti-ganti selama waktu hujan. Satu deskripsi empiris untuk infiltrasi dan *rainfall excess* adalah dengan *Curve Number Method*. Pada awal proses presipitasi, intensitas hujan umumnya lebih kecil daripada saat air sudah terinfiltrasi atau tersimpan dalam tanah. Hal ini terjadi akibat tekanan air yang tersimpan telah mengisi pori tanah dan tanah yang tertutup vegetasi juga menyebabkan bertambahnya *rainfall excess*. Ketika tanah daerah depresi simpanan vegetasi mendekati kejenuhan tertinggi maka simpanan air dilakukan pendekatan kejenuhan potensial/potensial saturation value (S') dan infiltrasi diperkirakan mendekati

angka nol. Kemudian angka rainfall excess akan sama dengan angka presipitasi. Rainfall excess (R) and watershed storage (S) adalah yang diperoleh dari presipitasi dan tipe tanah. Hubungan yang mungkin dengan diperlihatkan pada gambar dan rumus dibawah :

$$R = P - S$$

Keterangan :

$R = \text{rainfall excess}$

$P = \text{rainfall volume}$

$S = \text{storage volume}$ masuk dan dalam tanah (inisial abstraction plus infiltrasi)

Pada saat saturasi angka rainfall excess sama dengan intensitas presipitasi, hubungan proporsional dapat dibangun menjadi :

$$\frac{S}{S'} = \frac{R}{P}$$

Keterangan :

$S = \text{storage at any time (mm, in)}$

$S' = \text{storage at saturation (mm, in)}$

$R = \text{rainfall excess at any time (mm, in)}$

$P = \text{precipitation at any time (mm, in)}$

karena $S = P - R$, substitusi ke persamaan $\frac{S}{S'} = \frac{R}{P}$ didapat $R = \frac{P^2}{(P + S')}$ untuk

$I_A = 0$

Pekerjaan tambahan yang dilakukan oleh NRCS dan dilaporkan diberbagai publikasi (Kent, 1973) yang dikenali sebagai hubungan empiris antara inisial abstraksi dan simpanan dan begitu dibangun persamaan dimana inisial abstraksi diasumsikan sama dengan $0,2S\phi$. Bagaimanapun, nilai abstraksi untuk urban area adalah ditunjukkan lebih kecil jika jenis tipe tanah adalah A dan B dan kenyataannya, Golding (1986) direkomendasikan nilainya $0,075S\phi$ dan $0,10S\phi$ untuk A dan B tipe tanah perkotaan, berturut-turut. Menggunakan lebih dari 3000 tipe tanah yang dibagi menjadi empat grup tipe tanah, the NRCS dibangun runoff curve number (CN) untuk

mengestimasi S_0 pada persamaan $R = \frac{P^2}{(P+S')}$. Maksimum air yang tersimpan diperkirakan dalam *mm* dan *in* menggunakan :

$$S' = (25400/CN) - 254 \text{ Metric (mm) dan}$$

$$S' = (1000/CN) - 10 \text{ English (in)}$$

rainfall excess dipakai persamaan $R = (P - 0,2S')^2 - (P + 0,8S')$ jika $> 0,2S'$ dan $R = 0$ jika $P \leq 0,2S'$. *Runoff Curve Number* dapat diperkirakan jika klasifikasi tanah dan tata guna lahan diketahui.

II.4.3. Metode Rasional

Metoda rasional (*rational method*), di Inggris dikenal dengan nama Lloyd-Davis Method, dimana aliran besaran permukaan Q (*peak runoff*) yang berkaitan dengan intensitas jatuhnya hujan (*rainfall intensity*), dinyatakan dalam formula:

$$Q = C.i.A$$

Keterangan:

Q = *peak runoff*

C = *runoff coefficient*

i = *rainfall intensity*

A = *drainage area*

Metoda rasional (*Rational Method*) didasari atas beberapa asumsi:

- Nilai tertinggi (*the peak rate of runoff*) pada titik tinjauan sembarang, adalah fungsi langsung berkaitan dengan intensitas hujan rata-rata selama konsentrasi waktu pada titik yang ditinjau.
- Frekuensi debit puncak adalah frekuensi yang besarnya sama dengan intensitas hujan rata-rata.
- Waktu konsentrasi (*time of concentration*) adalah waktu yang diperlukan oleh aliran permukaan menjadi stabil (*established*) dan mengalir dari bagian paling hulu (*remote*) dari daerah drainase hingga ketitik tinjauan perencanaan.

Menetapkan faktor koefisien C cukup sulit karena nilainya harus mewakili banyak variabel, antara lain seperti infiltrasi, kemiringan permukaan (tanah), jenis media

penutup lahan (*ground cover*), *surface* dan *depression storage*, *antecedent precipitation and soil moisture*, bentuk profil saluran drainase, kecepatan aliran permukaan dan sebagainya.

Walupun metode rasional ini mempunyai keterbatasan, pengalaman yang lama dalam menggunakan formula ini oleh para perencana drainase perkotaan, ditemukan suatu definisi praktis tentang beberapa variabel yang berkaitan dengan koefisien C yang dipakai dalam formula metoda rasional ini; karena faktor koefisien C yang banyak merepresentasikan berbagai variabel yang terkait dengan koefisien C, disimpulkan bahwa justifikasi para perencana yang berpengalaman sangat menentukan dalam mengevaluasi faktor-faktor berbagai komponen.

Pengalaman menunjukkan bahwa penggunaan *Rational Method* memberikan hitungan hasil yang cukup memuaskan, terutama untuk suatu kawasan yang kecil, jika dilakukan perhitungan yang teliti dan saksama. Lebih dari 90% pemakai formula metoda rasional (*Rational Method*) di USA memberikan hasil yang memuaskan untuk kawasan drainase perkotaan. Karena formula ini sudah dipakai secara meluas diberbagai belahan bumi, di negara-negara maju, tidak salah kalau metoda rasional ini sangat sesuai dan cocok untuk juga digunakan secara praktis dalam perencanaan drainase perkotaan di DKI Jakarta.

II.5. PENGUJIAN DAYA DUKUNG

Untuk pengujian daya dukung tanah dasar di lapangan dapat dilakukan dengan beberapa cara, yaitu DCP (*Dynamic Cone Penetration*), *Sand Cone Test* dan CBR dengan *Mechanical Jack*. DCP (*Dynamic Cone Penetration*) dan *Mechanical Jack* digunakan untuk mengetahui nilai CBR tanah pada keadaan asli setempat di lapangan. Sedangkan *Sand Cone Test* bertujuan untuk mengetahui berat isi kering tanah lapangan γ_{lap} dan menentukan derajat kepadatan tanah. Pengujian berat isi kering biasanya dilaksanakan setelah dilakukan pengecekan nilai CBR spesifikasi di lapangan.

Hasil uji *Sand Cone Test* menghasilkan berat isi kering di lapangan yang selanjutnya dibandingkan dengan berat isi yang telah diuji di laboratorium untuk pengetesan CBR laboratorium. Dengan demikian, *Sand Cone Test* juga dapat digunakan untuk mengetahui besar CBR lapangan tanah dasar.

Kelemahan dari pengujian dengan DCP dan *Sand Cone Test* adalah hanya dapat dilakukan di pada material tanah. Karena dalam penelitian ini yang diuji tidak hanya tanah, namun juga pada material batu pecah, sehingga uji yang paling efektif untuk dilakukan adalah dengan *Mechanical Jack*.

Daya dukung tanah dasar (subgrade) pada perencanaan perkerasan lentur dinyatakan dengan nilai CBR yang menyatakan suatu kualitas tanah. Pengujian ini didasarkan atas pengujian Army corpd of Engineers dan lazim dipakai di Indonesia. Pengujian ini didasarkan atas pengujian penetrasi dan kemudian hasilnya berupa nilai CBR yang akan dipakai dalam menentukan tebalnya perkerasan.

Tabel 2.7. Nilai CBR dan penggunaannya.

CBR	Rating	Penggunaan
0-3	Sangat buruk	Subgrade
3-7	Buruk	Subgrade
7-20	Sedang	Subgrade
20-50	Baik	Base, Subbase
>50	Memuaskan	Base

II.6. HASIL PENELITIAN MENGENAI *PERMEABLE PAVEMENT* DI DEPARTEMEN TEKNIK SIPIL

Dian Indah Purnama Sari telah melakukan *piloting* untuk penelitian mengenai pemakaian *permeable pavement*, penelitian ini bertujuan untuk mengukur kapasitas infiltrasi dan daya dukung tanah dasar pada aplikasi permeabel pavement menggunakan *grass block*, dimana didapatkan hasil penelitian sebagai berikut:

- Telah dibuat metode pengukuran dan alat ukur yang dapat mengukur kapasitas infiltrasi dengan menggunakan metode horton dan rasional
- Dari percobaan dengan hujan alami dapat diketahui koefisien limpasan pada *permeable pavement* sebesar 16,45 %;
- Dari satu periode hujan dapat diketahui persentase limpasan sebesar 5,57% dan persentase infiltrasi sebesar 94,43%;

- Dari data hasil pengukuran didapat perhitungan total infiltrasi pada *permeable pavement* dengan rumusan,

$$F = 9,9t + \frac{(10 - 9,9)}{0,5}(1 - e^{-0,5t}) = 9,9t - 0,2(1 - e^{-0,5t})$$

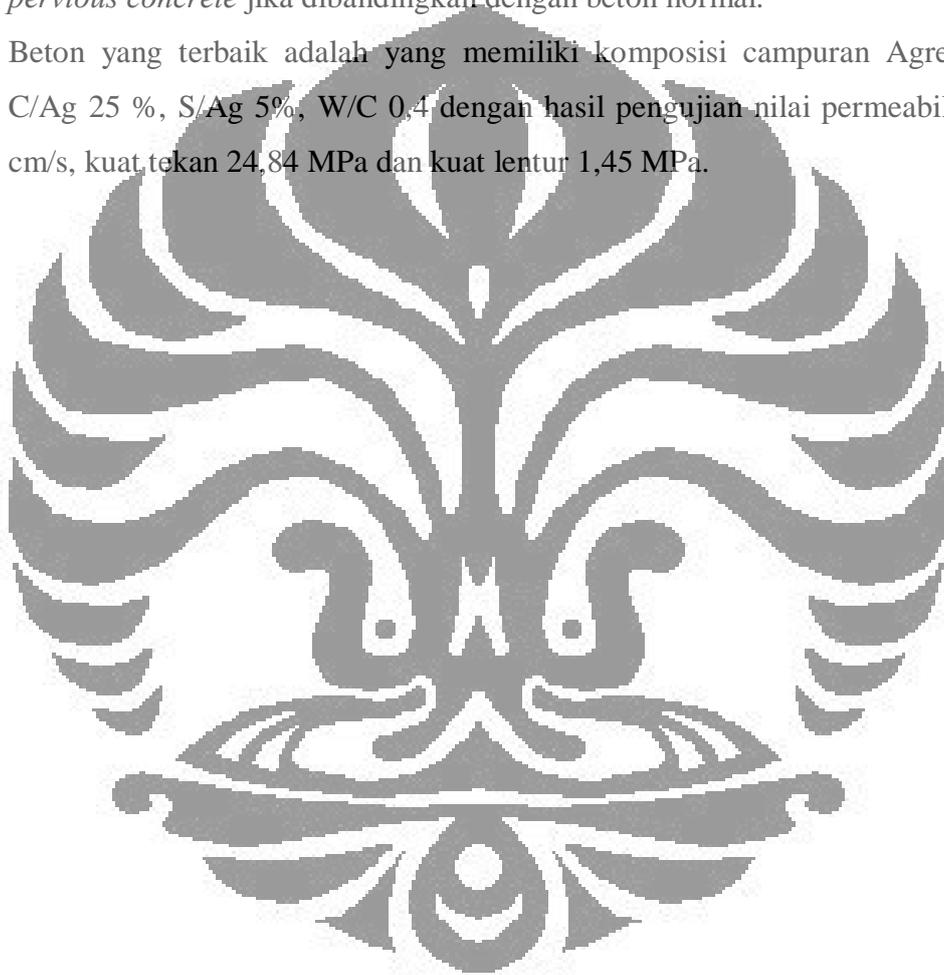
namun tidak dapat diketahui total infiltrasi karena pengukuran infiltrasi tidak terukur sampai aliran infiltrasi terhenti;

- Untuk dapat mengetahui nilai CBR lapisan agregat hanya dapat menggunakan uji CBR lapangan sehingga angkur jangan dilepas sampai pengujian benar-benar telah selesai untuk mengetahui nilai CBR model fisik jalan setelah terjadinya infiltrasi;
- Untuk penerapan jalan dengan *permeable pavement* sebaiknya menggunakan geotekstil impermeabel berbahan HDPE dengan proses penyambungan secara dilas;
- Keluaran air infiltrasi yang dihasilkan cukup banyak dan cukup efektif untuk menanggulangi banjir serta dapat mengkonservasi air tanah, sehingga perlu ditindaklanjuti dengan adanya sumur resapan;
- Uji coba *permeable pavement* menitikberatkan pada pengujian dari fungsi struktural jalan dan non struktural jalan sebagai media infiltrasi sehingga dapat mengurangi banjir dan mengkonservasi air tanah;
- Perubahan daya dukung tidak dapat diukur sebab angkur untuk uji CBR lapangan telah dilepas sesaat setelah pelaksanaan konstruksi sehingga tidak mungkin untuk dipasang kembali karena ukuran kanal yang kurang panjang;
- Dapat diketahui efektifitas dari fungsi infiltrasi air pada jalan permeabel yaitu sebesar 94,43%.

Selain itu, untuk lapisan perkerasan atas permeabel pavement, juga telah dilakukan penelitian mengenai rancang campur untuk beton lolos air (Roy Immanuel, 2008). Hasil dari penelitian yang berhubungan dengan penelitian ini adalah didapatkan rancang campur untuk beton lolos air dengan campuran tertentu. Adapun hal-hal yang berhubungan dengan proses pembuatan *pervious concrete* yang menjadi rekomendasi dari hasil penelitian tersebut adalah:

- *Pervious concrete* dibuat dengan komposisi semen, agregat kasar dengan gradasi yang seragam disertai dengan kandungan air pada batas kritis dan dengan atau tanpa pasir.

- *Pervious concrete* yang dibuat memiliki *Slump* nol.
- Pembuatan *pervious concrete* dengan metode *compaction* akan menghasilkan *pervious concrete* dengan kekuatan yang lebih tinggi.
- Besar porositas *pervious concrete* lebih dipengaruhi oleh campuran beton daripada ukuran agregat kasar.
- Susut yang terjadi pada *pervious concrete* lebih kecil jika dibandingkan dengan beton normal. Hal ini diakibatkan kandungan mortar yang lebih sedikit pada *pervious concrete* jika dibandingkan dengan beton normal.
- Beton yang terbaik adalah yang memiliki komposisi campuran Agregat $\frac{3}{4}$, C/Ag 25 %, S/Ag 5%, W/C 0,4 dengan hasil pengujian nilai permeability 0,82 cm/s, kuat tekan 24,84 MPa dan kuat lentur 1,45 MPa.



BAB III

RANCANGAN PERCOBAAN

III.1. PERTIMBANGAN DISAIN

Dalam perencanaan disain, ada beberapa hal yang perlu dipertimbangkan, seperti lokasi penelitian, karakteristik tanah dasar aktual di lapangan, karakteristik material yang akan digunakan dan data-data apa saja yang akan dibutuhkan sesuai dengan metode yang akan dipakai.

III.1.1. Lokasi Penelitian

Lokasi yang dipilih dalam penelitian ini adalah lahan parkir yang terletak di belakang Gedung Pusat Administrasi Fakultas (PAF). Pemilihan lokasi ini berdasarkan pertimbangan:

- Dekat dengan laboratorium Teknik Sipil sehingga memudahkan mobilisasi alat dan dekat dengan sumber air untuk hujan simulasi
- Nilai CBR dan karakteristik tanah dasar telah diukur pada penelitian Dian Indah Purnama Sari.
- Lokasi yang peruntukannya adalah tempat parkir merupakan pertimbangan agar tidak membuka lahan baru sehingga tidak perlu mengurangi ruang terbuka hijau yang ada di kampus dan telah digunakan pada penelitian sebelumnya.
- Lokasi ini sudah sesuai dengan *standard desain* dari *permeable pavement* yaitu memiliki *slope* kurang dari 5%¹² karena biasanya dalam perencanaan jalan ataupun lahan parkir digunakan standar untuk *slope* sebesar 2% untuk fungsi pengaliran limpasan.

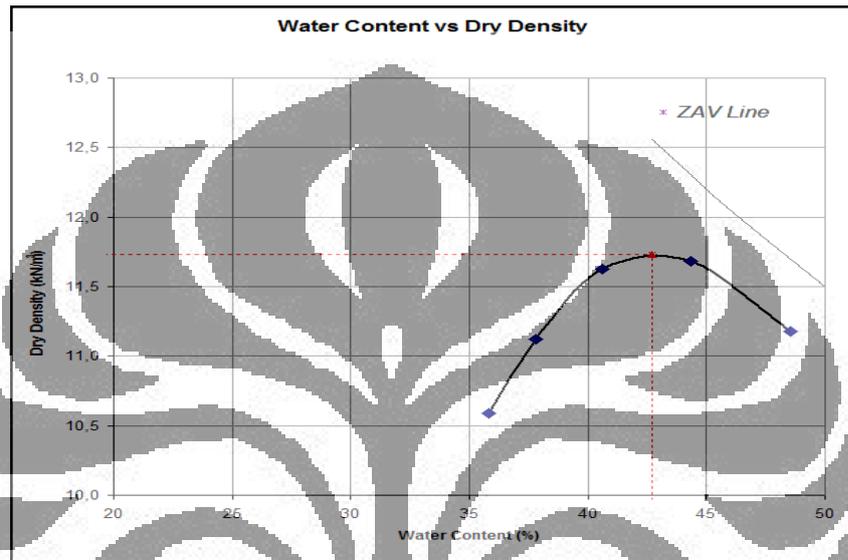
Berikut adalah hasil pengujian lapangan mengenai karakteristik tanah dasar lokasi penelitian:

Untuk mengetahui besar CBR tanah dasar dilakukan pengujian kadar air, compaction dan *SG (Specific Gravity)*. Kadar air awal digunakan untuk memprediksi campuran air yang akan digunakan untuk uji *compaction* sebanyak lima sampel. Dari uji *compaction* kelima sampel tersebut, akan didapat *-optimum* (kadar air optimum) yang selanjutnya merupakan data yang dibutuhkan untuk menakar air yang akan dicampurkan

¹² Knox County Tennessee Stormwater Management Manual, volume 2 (Technical Guidance), page 4-192

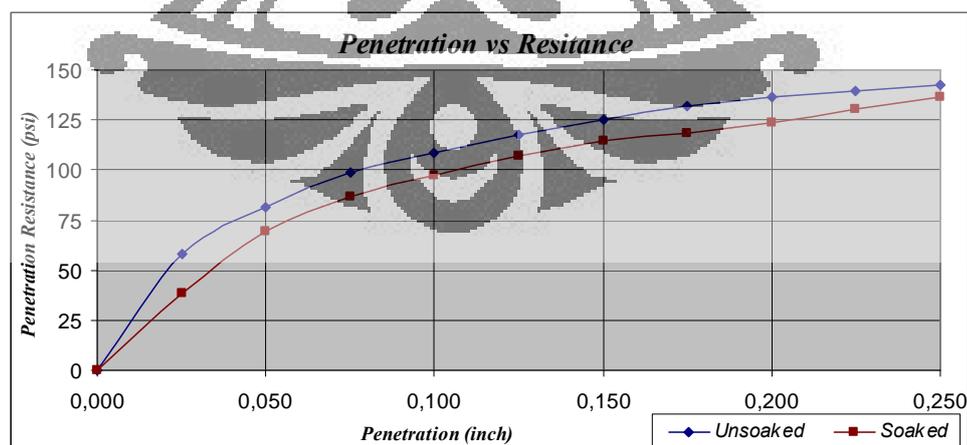
pada pengujian CBR laboratorium. Namun, sebelum didapatkan besar ω -optimum, dibutuhkan terlebih dahulu besar γ_{dry} yang didapatkan dari uji *SG (Specific Gravity)*.

Kadar air awal tanah dasar yang digunakan sebagai dasar prediksi variasi kadar air untuk uji compaction sebesar 23,72%. Variasi kadar air untuk lima sampel *compaction* adalah 36%, 39%, 42%, 45% dan 48%. Dari uji *SG (Specific Gravity)* dengan dua sampel, didapat besar G_s (*Specific Gravity*) 2,7066. Dengan demikian, didapat ω -optimum sebesar 42,69% dan γ_{dry} maksimum (*maximum dry density*) sebesar 11,73 kN/m³.



Gambar 3.1. Grafik perolehan ω -optimum dan γ_{dry} maksimum

Dengan beberapa pengujian yang telah dilakukan di atas, didapat data-data yang diperlukan untuk pengujian CBR laboratorium.



Gambar 3.2. Grafik Penetration vs Resistance pada uji CBR laboratorium tanah dasar

Tabel 3.1. Data uji CBR laboratorium untuk tanah dasar

<i>Penetration</i>	<i>Unsoaked</i>	<i>Soaked</i>
<i>(inch)</i>	<i>stress (psi)</i>	
0,000	0	0
0,025	58,12	38,7
0,050	81,37	68,97
0,075	98,42	86,79
0,100	108,49	96,87
0,125	117,79	106,94
0,150	124,76	114,92
0,175	131,74	118,56
0,200	136,39	123,99
0,225	139,49	130,19
0,250	142,59	136,39

Berdasarkan uji CBR yang telah diuji di laboratorium, didapat harga CBR dengan penetrasi mencapai 0,2 *inch* sebesar 9,09% (*unsoaked condition*) dan 8,27% (*soaked condition*).

Tabel 3.2. Hasil Uji CBR laboratorium untuk tanah dasar

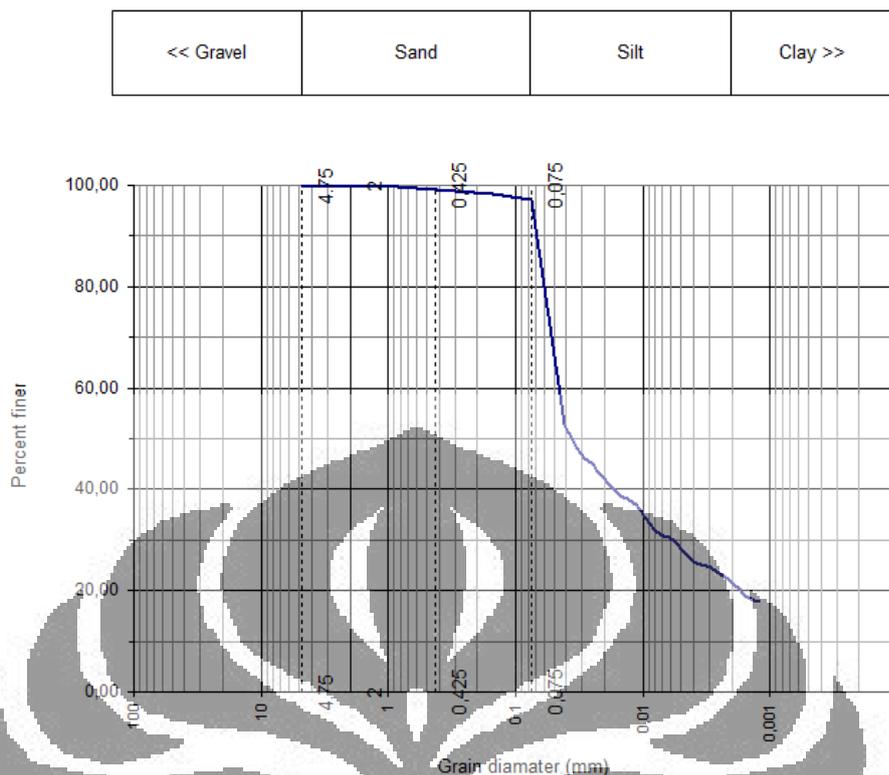
<i>Penetration</i>	<i>CBR (%)</i>	
	<i>unsoaked</i>	<i>soaked</i>
0,1	10,85	9,69
0,2	9,09	8,27

Dalam keadaan typical hujan, nilai CBR yang digunakan adalah nilai CBR lapangan yang telah diuji pada penelitian sebelumnya. Nilai CBR lapangan tersebut dapat dilihat pada tabel berikut.

Tabel 3.3. Persentase nilai CBR tanah dasar di lapangan

<i>Penetration</i>	<i>CBR (%)</i>
<i>(inch)</i>	
0,1	5,02
0,2	4,24

Dari uji *Grainsize* dengan *hydrometer* dan *sieve analysis*, diketahui distribusi butiran tanah 21,91% *clay*, 2,84% *sand* dan 75,25% *silt*. Dengan cara AASHTO, tanah ini tergolong tanah lempung lanauan. Tanah ini memiliki variasi tekstur, dari lumpur pasiran sampai lumpur lanauan atau lempungan.



Gambar 3.3. Grafik gradasi butiran pada tanah dasar

Berdasarkan uji laboratorium tanah yang telah dilakukan, dapat diketahui karakteristik dan jenis tanah dasar. Ada dua cara yang paling umum untuk menentukan klasifikasi tanah, yaitu cara AASHTO dan U.S.C.S. Tanah jenis ini baik sebagai komponen lapisan perkerasan jika dipadatkan dengan baik dan adanya saluran drainase yang memadai, jika tidak, akibat adanya air akan terjadi pengembangan (*swelling*) dan lapisan akan kehilangan daya dukungnya. Dengan cara U.S.C.S., diketahui bahwa tanah dasar termasuk jenis tanah lanau dan lempung karena lebih dari setengah materialnya lebih halus dari saringan no.200.

III.1.2. Karakteristik Material Penyusun

Material penyusun pondasi perkerasan jalan *permeable* didasari dari fungsinya, baik bersifat struktural maupun non struktural. Material penyusun pondasi jalan yang digunakan adalah batu pecah (*gravel*) dan pasir (*sand*). Kedua material ini merupakan pendukung struktural sekaligus non struktural. Hal ini disebabkan oleh fungsinya yang tidak hanya untuk mendistribusikan beban lalu lintas, namun juga sebagai mediator jalannya air yang terinfiltrasi.

Berdasarkan fungsinya tersebut itulah kedua material, batu pecah dan pasir, digunakan sebagai lapisan pondasi karena dapat menginfiltasikan hujan (*rainfall*) sehingga diharapkan dapat mengurangi aliran limpasan (*runoff*), namun dengan ketebalan tertentu juga diharapkan dapat menahan beban struktural.

Fungsi struktural pada material tidak hanya terbatas pada apakah material mampu mendistribusikan beban sampai ke tanah dasar dengan baik, namun juga dapat mempertahankan kestabilan struktur dengan mempertahankan daya dukung dari tanah dasar. Batu dan pasir memiliki dua fungsi tersebut, struktural dan non struktural, namun tidak mampu melindungi tanah dasar dari air. Fungsi struktural yang mampu mendistribusikan beban, namun tidak mampu mempertahankan daya dukung tanah dasar karena fungsi permeabilitasnya akibat hujan/*rainfall* menyebabkan dibutuhkan lagi suatu material pelindung tanah dasar untuk menjaga kestabilan daya dukung tanah dasar yaitu geotekstil *impermeable liner*. Walaupun tidak memiliki fungsi struktural pada pondasi jalan, namun material ini mampu melindungi tanah dasar dari air yang dapat menyebabkan perubahan kadar air yang berarti menurunkan daya dukungnya. Walaupun, tidak dapat dipungkiri tetap akan terjadi perubahan kadar air pada tanah dasar sekitar model fisik jalan jika terjadi hujan alami yang merupakan hujan lingkungan, bukan hujan simulasi yang merupakan hujan sistem.

Satu material penyusun lagi adalah geotekstil *non woven*. Material ini berfungsi sebagai separator antara lapisan material pasir dengan lapisan material batu pecah

III.1.3. Pengukuran Yang Dibutuhkan

Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui efektivitas dari *permeable pavement* dengan mengukur daya infiltrasi *permeable pavement* dan daya dukung tanah dasar.

III.1.3.1. Pengukuran Daya Infiltrasi

Untuk pengujian daya serap, digunakan metode Horton dan Rasional. Metode Horton meninjau efektivitas dari kapasitas infiltrasi, sedangkan Rasional meninjau efektivitas besar limpasan yang dihasilkan dari satu peristiwa hujan.

Kedua metode tersebut dapat digunakan dengan adanya variabel-variabel data yang terdapat dalam metode tersebut. Data utama yang signifikan diperlukan adalah besar intensitas ($I\text{-mm}$)¹³ ataupun total *rainfall* ($Q\text{-m}^3$) yang terjadi pada suatu waktu di luasan

¹³ Simbol-contoh satuan

area ($A-m^2$). Untuk menggunakan metode Horton, pada penelitian ini harus didapatkan data besar infiltrasi per satuan waktu ($f, \Delta h/\Delta t-mm/s$) dari awal hingga infiltrasi (f_0) yang terjadi konstan (f_c) karena telah terjadi kejenuhan. Untuk metode Rasional, dibutuhkan data total runoff ($Q-m^3$) yang terjadi dari awal hingga berakhirnya hujan. Pada penelitian ini data yang akan diambil adalah data runoff total, infiltrasi dan limpasan yang terjadi.

III.1.3.2. Pengukuran Daya Dukung

Untuk pengujian daya dukung tanah *permeable pavement*, mulai dari tanah dasar sampai lapisan material pondasi atas di lapangan, dilakukan uji CBR lapangan dengan *Mechanical Jack*. Alat-alat yang digunakan berupa angkur di kedua sisi jalan dan kanal yang melintang di atas sebagai penahan beban. Kanal terpanjang yang dimiliki laboratorium mekanika tanah departemen sipil sepanjang 1,25 m. Standar yang digunakan adalah ASTM.

Pengukuran akan dilakukan pada saat pelaksanaan konstruksi dan setelah dilakukan pengukuran daya serap. Pengukuran CBR pada saat konstruksi bertujuan untuk mengetahui kesesuaian dengan CBR rencana yang telah diuji di laboratorium, sedangkan pengukuran CBR setelah pengukuran daya serap bertujuan untuk mengetahui seberapa besar perubahan daya dukung jalan setelah terjadi hujan.

III.1.4. Disain Rekomendasi

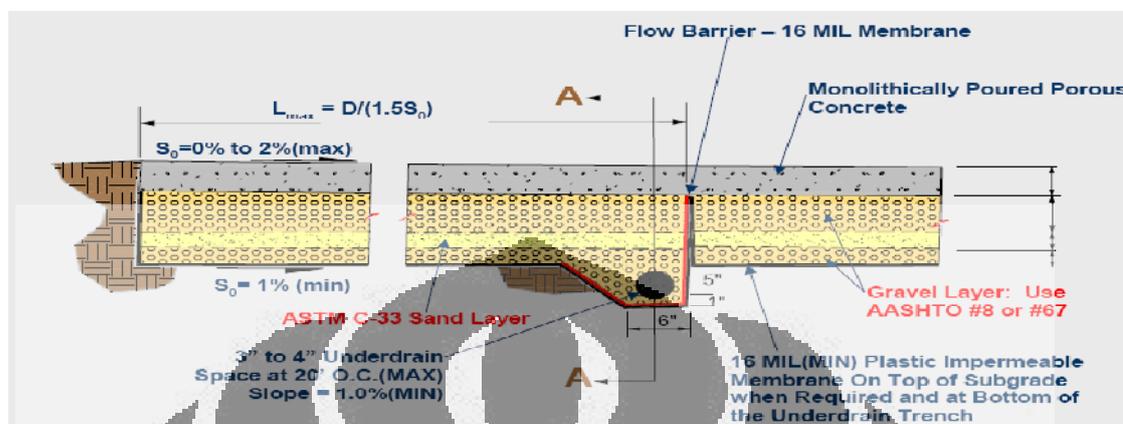
Dalam pendesainan *pervious concrete pavement*, digunakan beberapa rekomendasi dari *BMP Design Urban Drainage and Flood Control District, 2004*. Disain-disain yang dijadikan acuan sebagai berikut :

- a. *Voided Porous Concrete Pavement (PCP) Section* dengan sistem *underdrain*; dan
- b. *Porous Concrete Pavement (PCP)* dengan *underdrain*.

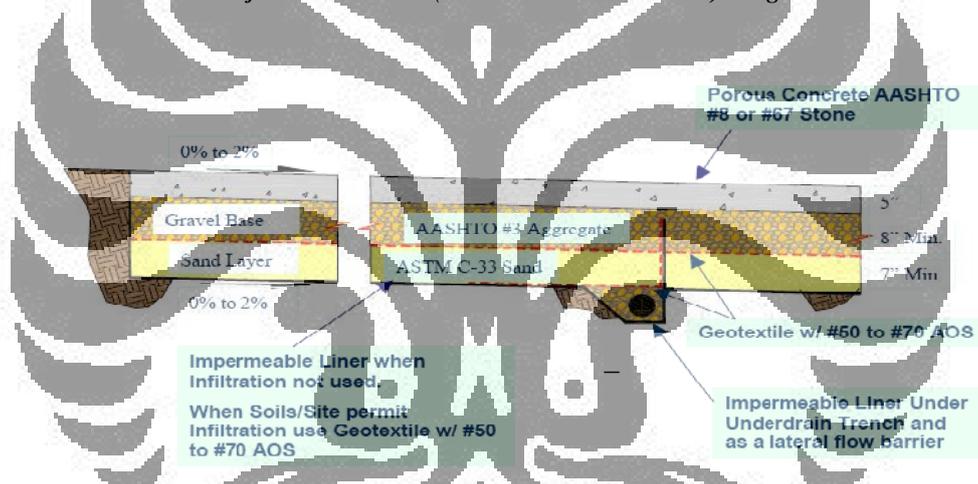
Dari desain-desain rekomendasi, terdapat beberapa standar, yaitu:

- a. slope lapisan dasar yang mengalirkan air ke pipa 0%-2% maksimumnya atau minimum 1%;
- b. lebar maksimum per segmen dengan 1 batang pipa berlubang sama dengan kedalaman dibagi dengan 1,5 kali slope (kemiringan);
- c. pipa *perforated* atau berlubang berukuran diameter 4 inch;
- d. material pasir yang digunakan tipe *sand filter* ASTM C-33;

- e. material batu pecah yang digunakan berkisar antara #3, #4, #8 atau #67 AASHTO;
- f. material *impermeable liner* dan geotekstil non woven sebagai separator antara dua lapisan material; dan
- g. tebal lapisan pondasi minimum.



Gambar 3.4. Desain jalan Voided PCP (Porous Concrete Pavement) dengan sistem underdrain



Gambar 3.5. Desain jalan PCP (Porous Concrete Pavement) dengan underdrain

III.2. MODIFIKASI DISAIN PERMEABLE PAVEMENT

Desain dari *Permeable Pavement* yang akan diterapkan saat ini adalah desain yang telah banyak diterapkan di luar negeri. Dari desain tersebut dibuatlah desain baru yang sesuai dengan bahan yang ada di Indonesia mengacu dari aplikasi di luar negeri. Bahan tersebut terdiri dari pasir, batu pecah (gravel), agregat dan geotekstil.

Model fisik yang akan dibuat berukuran luas 1m x 3m. Berdasarkan standar pada desain rekomendasi, lebar yang diijinkan kurang dari satu per 1,5 kali slope atau kemiringannya dari kedalaman struktur pondasi. Dengan slope 1 %, lebar maksimum yang

dijinkan berarti 26,67 m. Untuk model fisik jalan yang akan dibuat untuk penelitian ini berukuran panjang 3 m dengan lebar jalan 1 m. Berikut ini adalah perhitungannya.

$$L_{maks} = \frac{D}{1,5S_o} = \frac{0,39cm}{1,5 \times 0,01} = 2600cm = 26m$$

III.2.1. Perencanaan Tebal Perkerasan

Komponen dalam perencanaan desain struktur *permaeble pavement* meliputi perencanaan tebal lapisan dan material penyusun struktur pondasi sampai perkerasannya. Dalam menentukan tebal perkerasan untuk *Pervious concrete* dilakukan perhitungan yang sama dengan penentuan tebal perkerasan untuk jalan *flexible*. Pernyamaan ini memiliki beberapa alasan sehingga hal ini dapat dilakukan, diantaranya:

1. Jalan lentur merupakan jalan dengan lapisan perkerasan atas yang tidak *rigid* (lentur) dimana pada kasus ini *pervious concrete* yang dibuat akan dipisahkan per segmentnya, sehingga lebih mirip dengan jalan lentur. Karena beban yang diterima dari atas hanya diterima oleh segmen tersebut, yang mana sifat seperti ini dimiliki oleh jalan lentur.
2. Jalan kaku menahan sendiri beban yang ada pada pelatnya, sedangkan pada kasus *pervious concrete* yang dibagi per segment ini beban disalurkan ke lapisan pondasi dan diteruskan lagi hingga mencapai lapisan tanah dasar. Hal ini sangat mirip dengan prinsip jalan lentur.
3. Untuk lapisan tanah dasar dilakukan stabilisasi, dan diberikan kemiringan sebesar 2%, sehingga apabila dialiri air, lapisan tanah dasar tidak menyerap air dan nilai CBR tanah dasar tidak terpengaruh sama sekali karena air langsung dialirkan ke tempat yang lebih rendah. Ini menjadikan pada penelitian ini tidak menggunakan lapisan *impermeable* untuk membatasi lapisan tanah dasar dengan konstruksi jalan.

Lapisan struktur pondasi perkerasan jalan permeabel ini sama dengan perkerasan lentur (*flexible pavement*) yaitu sistem perkerasan yang konstruksinya terdiri dari beberapa lapisan. Tiap-tiap lapisan perkerasan pada umumnya menggunakan bahan maupun persyaratan yang berbeda sesuai dengan fungsinya yaitu, untuk menyebarkan beban roda kendaraan sehingga dapat ditahan oleh tanah dasar dalam batas daya dukungnya. Tanah dasar sebagai landasan dari kesatuan struktur jalan harus memiliki daya dukung yang

memadai terhadap beban yang akan diterimanya, baik dari beban rencana sesuai peruntukan jalan maupun beban struktur penyusunnya sendiri.

Pondasi struktur jalan terdiri dari beberapa lapisan, baik yang bersifat struktural maupun non struktural. Lapisan struktural sangat mempengaruhi kekuatan / daya dukung jalan agar memadai dalam menerima dan menyalurkan beban yang diterimanya, sedangkan lapisan non struktural tidak.

Tebal minimum lapisan pondasi dengan bahan penyusun batu pecah sebesar 25 cm jika sebagai lapisan pondasi atas dan 10 cm jika sebagai lapisan pondasi bawah.¹⁴ Namun, berdasarkan *BMP Design Urban Drainage and Flood Control District, 2004* yang merupakan dasar perencanaan desain baru yang akan dimodifikasi tebal minimum sebesar 7 inch atau 17,78 cm. Material penyusun ini merupakan lapisan pondasi atas. Batu pecah juga merupakan pengisi lapisan berpipa pada bagian dasar menutupi hampir 2/3 permukaan pipa yang selanjutnya ditimbun dengan pasir.

Berikut ini adalah perhitungan pada perencanaan tebal lapisan pondasi, baik ditinjau dari fungsi struktural maupun non struktural.

➤ *Lapisan Struktural*

Satu hal mendasar untuk kasus ini adalah material penyusun pondasi struktural adalah batu pecah dan pasir dengan nilai CBR dalam kondisi jenuh. Karena kondisi jalan yang *permeable*. Model fisik konstruksi jalan dengan perkerasan *permeable* ini dibuat dengan perencanaan jalan sebagai berikut:

- a. terdiri dari dua jalur;
- b. faktor regional senilai satu;
- c. CBR tanah dasar 4,24% (pada saat jenuh), didapatkan DDT sebesar 4,4; dan
- d. umur rencana 20 tahun;
- e. perkembangan lalu lintas $i = 1\%$

Desain rencana model fisik jalan ini termasuk lalu lintas rendah sehingga dapat diasumsikan beban kendaraan lalu lintasnya berupa kendaraan ringan (mobil pribadi) seberat 2 ton sebanyak 90 buah, bus 8 ton sebanyak 3 buah dan truk 2 as seberat 10 ton sebanyak 2 buah. Jumlah data ini yang merupakan LHR (Lalu lintas Harian Rata-rata) awal, yaitu 95 kendaraan/ hari/dua arah.

¹⁴ Berdasarkan SKBI 2.3.26.1987 / SNI 03-1732-1989

Besar nilai LHR pada awal dan akhir rencana akan menjadi ($i = 1\%$), yaitu mobil pribadi seberat 2 ton sebanyak 110 buah, bus 8 ton sebanyak 4 buah dan truk 2 as seberat 10 ton sebanyak 3 buah.

Sesuai dengan beban-beban kendaraannya, maka didapat angka ekivalen (E) sebesar 0,0004 untuk mobil pribadi, 0,1593 untuk bus 8 ton dan 0,35 untuk truk 2 as 10 ton dengan perhitungan untuk

$$\text{Mobil pribadi 2 ton (1+1)} = 0,0002 + 0,0002 = 0,0004 \quad ;$$

$$\text{Bus 8 ton (3+5)} = 0,0183 + 0,141 = 0,1593 \quad ; \text{ dan}$$

$$\text{Truk 2 as 10 ton (4+6)} = 0,0577 + 0,2923 = 0,35.$$

Dalam perhitungan LEP (Lintas Ekivalen Permulaan), didapat besar LEP untuk sebesar 0,018 untuk mobil pribadi, 0,239 untuk bus 8 ton dan 0,35 untuk truk 2 as 10 ton dengan perhitungan untuk

$$\text{Mobil pribadi 2 ton} = 90 \times 0,5 \times 0,0004 = 0,018 \quad ;$$

$$\text{Bus 8 ton} = 3 \times 0,5 \times 0,1593 = 0,239 \quad ; \text{ dan}$$

$$\text{Truk 2 as 10 ton} = 2 \times 0,5 \times 0,35 = 0,35$$

dan total LEP keseluruhan sebesar 0,607.

Dalam perhitungan LEA (Lintas Ekivalen Akhir), didapat besar LEA untuk sebesar 0,018 untuk mobil pribadi, 0,239 untuk bus 8 ton dan 0,35 untuk truk 2 as 10 ton dengan perhitungan untuk

$$\text{Mobil pribadi 2 ton} = 110 \times 0,5 \times 0,0004 = 0,022 \quad ;$$

$$\text{Bus 8 ton} = 4 \times 0,5 \times 0,1593 = 0,3186 \quad ; \text{ dan}$$

$$\text{Truk 2 as 10 ton} = 3 \times 0,5 \times 0,35 = 0,525$$

dan total LEP keseluruhan sebesar 0,8656.

Dalam perhitungan LET (Lintas Ekivalen Tengah), dihitung berdasarkan rumus $LET = \frac{1}{2} (LEP + LEA) = 0,7363$

Untuk perhitungan LER (Lintas Ekivalen Rencana) dengan umur rencana 20 tahun, maka $LER = 0,7363 \times \frac{20}{10} = 1,4726$.

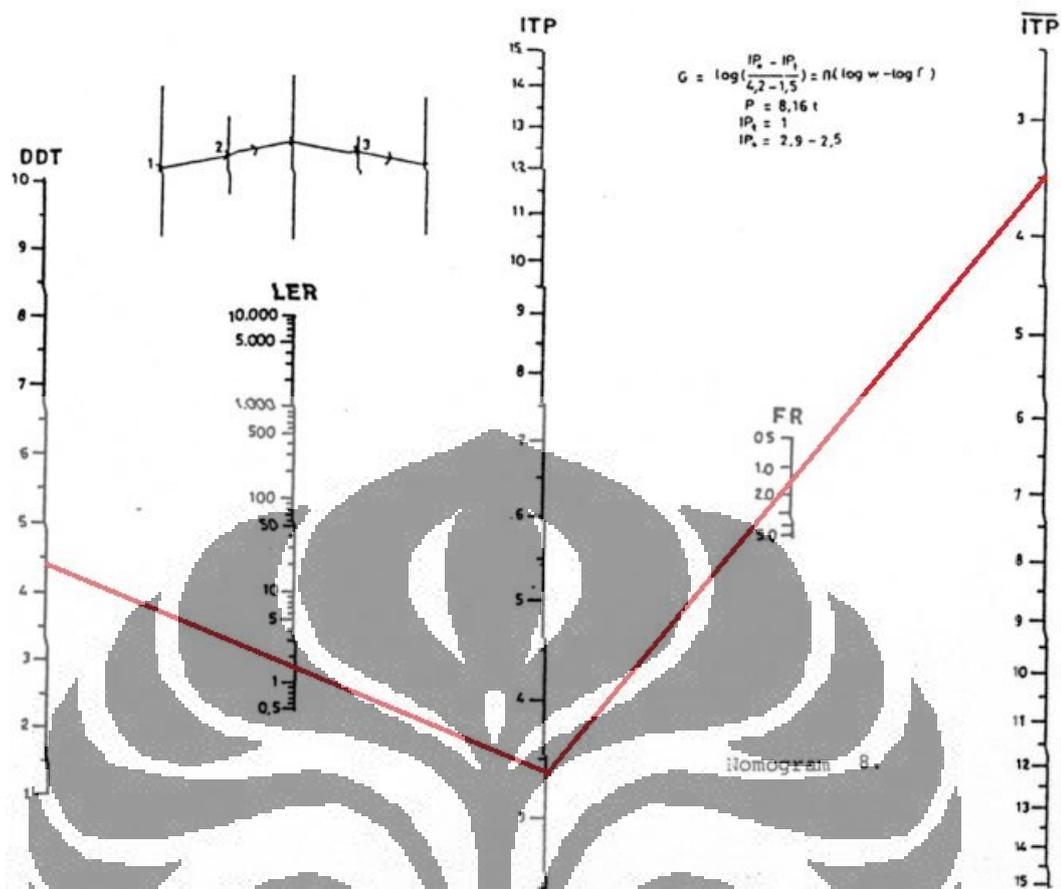
Dalam menentukan ITP (Indeks Tebal Perkerasan), berdasarkan hasil uji CBR tanah dasar sebesar 4,24%, didapatkan DDT sebesar 4,4 (gambar korelasi DDT dengan CBR), dengan jenis perkerasan berupa *pervious concrete* yang dapat dikategorikan sebagai latasir (Lapis Tipis Aspal Pasir) sehingga memiliki Ipo 2,9 ó 2,5 diambil nilai 2,5, dan dengan nilai Ipt = 1 yang menyatakan permukaan jalan

dalam keadaan rusak berat sehingga sangat mengganggu lalu lintas kendaraan dimana nilai Ipt ini juga disesuaikan dengan klasifikasi jalan lokal dengan LER kecil dari 10, maka ditetapkan penggunaan monogram 8



Gambar 3.6. Korelasi DDT dan CBR

Penentuan tebal perkerasan ini dapat terlihat pada gambar dengan penggunaan nomogram 8. Nilai FR adalah 1,5 untuk jalan dengan kelandaian < 6% dan % kendaraan berat < 30%, dengan iklim > 900mm/th.



Gambar 3.7. Penentuan tebal perkerasan dengan nomogram 8

Dalam penetapan tebal perkerasan, dibutuhkan koefisien kekuatan relatif yang bergantung pada besar CBR dari material penyusun, yaitu pasir dan agregat. Oleh karena itu, perlu dilakukan pengujian CBR di laboratorium untuk material pasir dan agregat dalam kondisi *soaked* dan *unsoaked*. Data CBR yang digunakan adalah dalam kondisi *soaked* (terendam) karena material penyusun pondasi nantinya akan berfungsi tidak hanya sebagai struktur, namun juga sebagai media lewatnya aliran infiltrasi. Karena mudah dipadatkan, pemadatan pasir dilakukan dengan compaction, yaitu mirip dengan pengujian CBR tanah.

Dengan ITP yang bernilai 3,5 dan koefisien kekuatan relatif permukaan koefisien kekuatan relatif (a_1) untuk permukaan aspal poros sama dengan 0,30, koefisien kekuatan relatif agregat dalam keadaan jenuh air atau *soaked* (a_2) sebesar 0,12 dan pasir yang sudah dipadatkan dalam keadaan jenuh air atau *soaked* (a_3) sebesar 0,10 selanjutnya dimasukkan ke dalam perumusan tebal perkerasan. Dengan demikian, didapat perhitungan sebagai berikut: $ITP = a_1 \cdot D_1 + a_2 \cdot D_2 + a_3 \cdot D_3$,

dengan tebal batu pecah minimum (20 cm) dan tebal pasir minimum sebesar 15 cm, didapatkan tebal perkerasan aspal porous dibawah 0, hal ini menunjukkan bahwa tanpa lapisan perkerasan aspal porous, struktur jalan sudah mampu menahan beban yang direncanakan. Untuk itu direncanakanlah tebal perkerasan aspal porous sebesar 50 atau sebesar 13 cm.

Dari perhitungan di atas, dapat diketahui bahwa lapisan pondasi secara struktural sudah sangat memenuhi bila digunakan standard desain dari *BMP Design Urban Drainage and Flood Control District, 2004*, yaitu tebal minimum pasir sebesar 7 in atau hampir 18 cm dan tebal lapisan batu pecah sebesar 20 cm.

➤ *Lapisan Non-Struktural*

Lain halnya dengan lapisan struktural, lapisan non struktural tidak memiliki andil terhadap kekuatannya dalam menerima beban, namun secara fungsional diharapkan dapat menjadi media penelusan air yang terinfiltrasi dengan baik. Dalam menentukan tebal lapisannya, hal utama yang ditinjau adalah daya *permeability* optimumnya.

Lapisan pondasi yang bersifat non struktural juga dimiliki oleh kedua jenis material yaitu pasir dan agregat sebagai penyusun pondasi. Secara non struktural, kedua lapisan material ini dapat menjadi mediator infiltrasi air. Dengan daya *permeability* dan porositas dari masing-masing lapisan dapat memungkinkan terjadinya infiltrasi pada perkerasan jalan tersebut. Untuk mengetahui lama aliran air yang melalui lapisan material tersebut, dibutuhkan uji *permeability*. Selain itu, data *permeability* dari material tersebut juga digunakan untuk memprediksi besar debit hujan dan dimensi ukuran bak penampungan.

Untuk mengetahui daya permeabilitas pada pasir, perlu dilakukan uji *permeability* agar dapat diprediksi berapa debit aliran yang akan terjadi di lapisan tersebut. Untuk batu pecah, tidak ada alat uji *permeability* yang memadai untuk dilakukan, namun hal lain yang dapat dilakukan adalah dengan uji berat isi agar dapat diketahui besar volume rongga (*void*/porositas) pada lapisan material tersebut. Sebagai acuan sebelum dilakukannya uji coba tersebut, dapat digunakan data-data yang didapat dari literatur. Berdasarkan data dari daftar porositas material (tabel 3.7), dapat diasumsikan besar *void* atau volume rongga pada lapisan agregat (*gravel base*) sebesar $\pm 20\%$.

Tabel 3.4. Daftar Porositas

Material yang berbutir	Porositas	Porositas Efektif %
Tanah lempung (Lapisan Penutup)	45-50	5-10
Tanah liat (Geluh)	35-45	5- 8
Pasir halus	40-50	
Pasir menengah	35-40	20-25
Pasir kasar	25-30	
Kerikil	20-30	
Campuran pasir dan kerikil	10-30	15-20
Campuran lempung, pasir dan kerikil.	25-45	
<i>Material terkonsolidasi</i>		
Batu pasir	5-30	
Batuan karbonat dengan porositas tambahan Serpih	10-20	
Batuan yang padat, rapat	<1	
Batuan yang retak-retak/pecah atau batuan lapuk (akifer)	2-10	
Batuan yang retak atau lapukan (dari sample core)		
Batuan gunung api		

Nilai koefisien permeabilitas dapat diperoleh dari beberapa literatur seperti terlihat pada tabel 3.5. Data tersebut dapat menjadi acuan ataupun perbandingan terhadap hasil uji yang akan dilakukan.

Tabel 3.5. Daftar Nilai Koefisien Permeabilitas

TIPE TANAH	KOEFS. PERMEABILITAS	
	(cm/det)	(m/hari)
Kerikil (Clean Gravel)	1.0 dan lebih	10^2 - lebih
Pasir kasar (coarse/clean sand)	1.0 - 0.01	10^2 - 10^1
Pasir campuran (sand-mixture)	0.01- 0.005	10^1 - 10^0
Pasir halus (fine sand)	0.05-0.001	10^0 - 10^{-1}
(Silty sand)	0.002-0.0001	10^0 - 10^{-2}
(Silt)	0.0005-0.00001	10^{-4} - 10^{-6}
Tanah lempung (clay)	0.000001 dan kurang	10^{-4} - kurang

Uji *permeability* pasir menggunakan standar ASTM dengan alat uji *permeability*. Uji yang dilakukan dengan dua sampel, yaitu dengan pasir yang dipadatkan dengan standard compaction dan pemadatan pasir biasa didapatkan hasil sebagai berikut :

- a. pemadatan dengan *standard compaction*, dengan mold berukuran diameter 9,9 cm dan tinggi 13,02 cm didapat volume persatuan waktu selama beberapa kali pengamatan ulang sebesar 50 cc per 30 menit sehingga didapat besar nilai koefisien

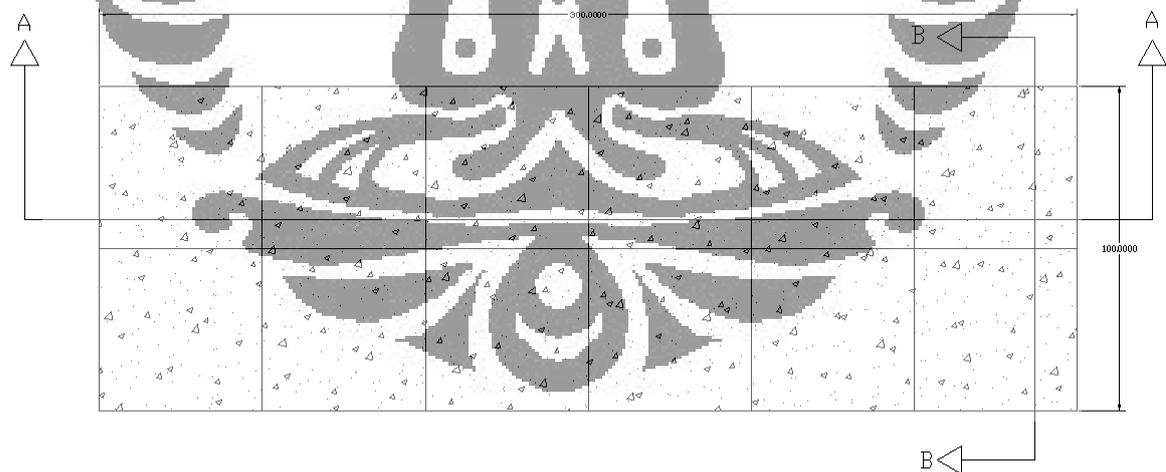
$$k = \frac{Q.L}{A.h.t} = \frac{(50)(13,02)}{(76,98)(115)(1800)} = 4,08.10^{-5} \text{ cm / s ; dan}$$

- b. pemadatan biasa, dengan mold berukuran diameter 10,2 cm dan tinggi 10,95 cm didapat volume persatuan waktu selama beberapa kali pengamatan ulang sebesar 1470 cc per 5 menit sehingga didapat besar nilai koefisien

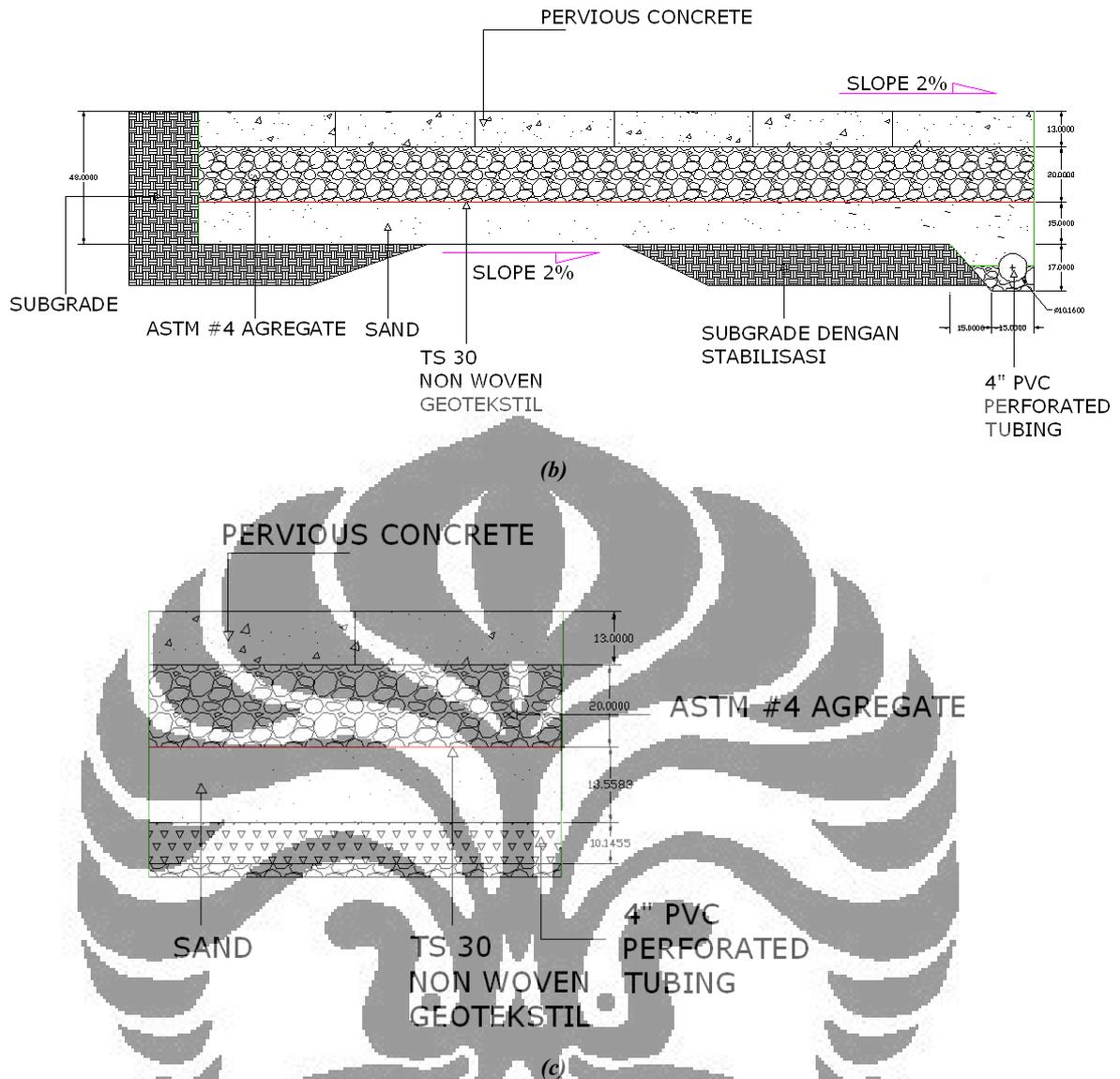
$$k = \frac{Q.L}{A.h.t} = \frac{(1470)(10,95)}{(81,67)(115)(300)} = 5,71.10^{-3} \text{ cm / s .}$$

III.2.2. Gambar Rencana Model Fisik Jalan *Permeable*

Setelah dilakukan perhitungan ketebalan dari setiap lapisan jalan berdasarkan buku petunjuk perencanaan tebal perkerasan lentur jalan raya dengan kode SKBI 6 2.3.26.1987 ; UDC : 625.73(02) dan melihat desain rekomendasi dari *BMP Design Urban Drainage and Flood Control Distriet, 2004*, maka didapatkan gambar rencana dari model fisik sebagai berikut:



(a)



Gambar 3.8. Desain modifikasi jalan permeabel dengan porous asphalt : (a) tampak atas; (b) potongan A-A; dan (c) potongan B-B

III.2.3. Rancang Campur Lapisan Perkerasan

Rancang campur dari lapisan perkerasan *pervious concrete* ini adalah rancang campur yang telah dilakukan oleh penelitian Roy Immanuel, 2008. Pada penelitian tersebut telah didapatkan rancang campur untuk perkerasan beton lolos air dengan kuat tekan 24,84 MPa, kuat lentur 1,45 MPa dan permeabilitas 0,82 cm/s. Adapun komposisi material yang digunakan adalah menggunakan agregat kasar dengan ukuran $\frac{3}{4}\phi$, %C/Ag = 25, % S/Ag = 5 (lolos saringan 4), sedangkan W/C adalah 0,4.

Berdasarkan komposisi material yang telah ada, dapat ditentukan jumlah material yang digunakan untuk pembuatan beton berpori ini. Setelah dilakukan pengujian di laboratorium terhadap bahan yang akan digunakan, didapatkan Specific Gravity dari Agregat sebesar 2,52 dan Specivic Gravity dari Agregat halus sebesar 2,59, didapatkan perbandingan dan jumlah masing-masing material seperti pada tabel berikut:

Tabel 3.6. Tabel Kebutuhan Material Untuk Pervious Concrete

Bahan	mix design	untuk 1m ³ camp	Berat (Kg)
Aggregat Kasar	1	0.7142857 m3	1800.00
Cement	0.25	0.1785714 m3	562.50
Sand	0.05	0.0357143 m3	92.50
W	0.1	0.0714286 m3	71.43
Jumlah	1.4	1 m3	

Berdasarkan tabel diatas, dapat ditentukan jumlah material yang dibutuhkan untuk satu kali pengecoran. Bekisting/ cetakan yang digunakan adalah cetakan dengan ukuran 50 x 50 x 13 cm. Sehingga volume beton untuk 1 cetakan adalah 0,0325 m³. Namun campuran beton ini yang bisa meloloskan air, memungkinkan terjadinya pengurangan volume beton dari yang seharusnya karena terdapat udara dalam campuran beton ini. Sehingga volume yang dipakai hanya 90% dari volume 1 cetakan, yaitu sebesar 0,029 m³. Nilai tersebut kemudian dikalikan dengan jumlah bahan untuk setiap m³, sehingga didapatkan campuran bahan untuk satu cetakan adalah sebagai berikut:

Tabel 3.7. Campuran bahan untuk 1 cetakan

Bahan	Untuk 1 cetakan	berat
Aggr	0.020893 m3	52.65 Kg
Cement	0.005223 m3	16.45 Kg
Sand	0.001045 m3	2.71 Kg
W	0.002089 m3	2.09 Kg
Jumlah	0.029 m3	

III.3. ALAT DAN BAHAN

III.3.1. Konstruksi Model Fisik Jalan Permeabel

Lapisan perkerasan terdiri dari lapisan permukaan yang merupakan aspal porous dan beton lolos air. Sementara itu untuk lapisan subgrade digunakan batu pecah dan untuk subbase dari model ini digunakan pasir. Adapun bahan-bahan yang diperlukan adalah:

III.3.1.1. Pasir dan Agregat

Pasir dan agregat yang digunakan pada penelitian ini adalah sebagai lapisan struktural dan non-struktural. Struktural karena pasir ini dapat mendistribusikan beban yang ada di permukaan ke tanah dasar, non-struktural karena pasir ini juga sebagai media jalannya air ke tanah dasar dibawahnya.

Selain untuk lapisan, agregat juga digunakan dalam campuran lapisan perkerasan aspal porous dan beton berpori. Persyaratan material yang dibutuhkan untuk campuran kedua perkerasan tersebut disesuaikan dengan kebutuhan. Dapat dilihat pada rancang campur pada tiap perkerasan.

III.3.1.2. Semen

Semen yang digunakan pada penelitian ini berguna sebagai campuran pada lapisan beton berpori. Semen yang digunakan adalah semen tipe I dengan merek Semen Padang. Pemilihan ini didasarkan pada semen jenis ini digunakan pada penelitian Ni Made Rahmayati yang menjadi acuan pada pembuatan beton berpori pada penelitian ini.

III.3.1.3. Pipa perforated

Pipa perforated yang digunakan berukuran 4 *inch*. Pipa ini berguna untuk menampung infiltrasi yang dari hujan simulasi ataupun dar hujan alami dalam pengambilan data yang tidak dapat langsung masuk kedalam tanah dasar. Pipa ini diletakkan dibawah konstuksi jalan permeabel. Oleh karena itu pipa ini harus memenuhi kekuatan untuk menahan beban perkerasan dan beban kendaraan yang akan melewati jalan permeabel ini.

III.3.1.4. Geotekstil

Geotekstil yang digunakan dua jenis, yaitu *impermeable liner* dan non woven. Material geotekstil digunakan sebagai separator agar material antar lapisan jalan tidak tercampur yang dapat menyebabkan air tidak dapat mengalir melalui

lapisan yang tercampur tersebut. Kedua geotekstil yang digunakan pada penelitian adalah produk dari PT. Tetrasa Geosinindo. Berikut adalah geotekstil yang digunakan dalam penelitian ini.

III.3.1.4.1. *Geotekstil impermeable liner*

Geotekstil *impermeable* berguna untuk menutupi seluruh dinding tanah struktur pondasi. Material ini berguna untuk menghindari terjadinya rembesan ke dinding tanah di sekeliling struktur pondasi. Di samping itu, material ini juga sebagai *control volume* pada penelitian yang akan dilakukan.

Geotekstil impermeabel terdiri dari dua lapis. Lapisan luar yang langsung berhubungan dengan tanah berbahan PVC dan bagian dalam berbahan serabut fiber yang sama dengan bahan geotekstil non woven. Lapisan fiber ini berfungsi untuk memperkecil gesekan antara lapisan PVC dengan material (pasir dan agregat), terutama saat distamper agar tidak rusak (berlubang ataupun sobek).

Untuk geotekstil impermeabel, agar memudahkan pengerjaan, sebelum pelaksanaan di lapangan, material ini dipotong-potong seukuran dengan sisi-sisi lapisan pondasi dari model fisik jalan. Sisi-sisi yang dimaksud adalah di seluruh sisi tanah yang telah digali agar terlindungi dari air sehingga tidak mengganggu daya dukungnya.

Sebenarnya *geotekstil impermeable liner* ada dua macam berdasarkan bahan dasar, berbahan PVC dan HDPE. *Geotekstil impermeable liner* berbahan HDPE yang merupakan barang impor memiliki kualitas yang lebih baik ditinjau dari bahan dan ketebalannya. Bahan ini dapat disambungkan dengan cara di las. Karena penelitian ini hanya membutuhkan bahan yang sedikit, maka yang digunakan adalah geotekstil yang berbahan PVC. Selain perekatnya mudah didapat di toko material untuk geotekstil berbahan PVC, alat pengelas untuk menyambungkan geotekstil berbahan HDPE saat itu sedang digunakan untuk kebutuhan proyek di luar kota sehingga geotekstil yang memungkinkan untuk digunakan adalah yang berbahan PVC.

III.3.1.4.2. *Geotekstil non woven*

Geotekstil *non woven* dalam struktur ini terletak diantara lapisan pasir dengan lapisan batu pecah/agregat atau gravel base. Material ini berfungsi sebagai

pemisah antara kedua material penyusun ini, mencegah agar keduanya bercampur saat aliran infiltrasi besar melalui lapisan tersebut.

Geotekstil non woven dipotong di tempat, langsung saat pembuatan model fisik jalan agar tepat menutupi lapisan material di bawahnya, yaitu pasir. Sesuai dengan fungsinya, material ini menutupi penuh lapisan pasir agar tidak bercampur dengan lapisan batu pecah atau agregat yang berada tepat di atasnya. Geotekstil non woven yang digunakan dalam percobaan ini adalah tipe *Polyfet TS Nonwoven Geotextiles TS 50*.

III.3.2. Instalasi Simulator Hujan

Untuk simulasi hujan, sumber air yang digunakan sebagai hujan simulasi terletak di belakang gedung PAF FTUI dekat pos satpam, tepatnya 50 m dari lokasi jalan yang akan dibuat. Untuk mengalirkan air dari sumber ke area jalan permeabel, dibutuhkan suatu instalasi yang memadai sesuai dengan rancangan percobaan.

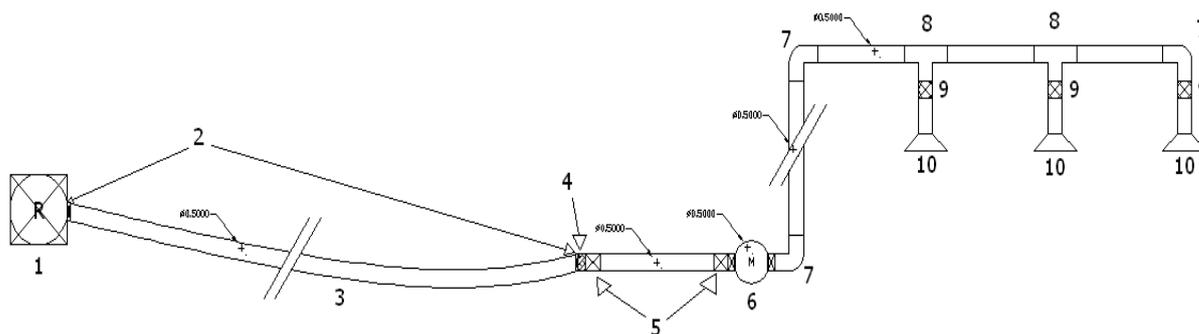
Alat dan bahan yang akan digunakan untuk pembuatan instalasi hujan buatan ini diantaranya selang, nepel selang, cincin selang, meteran air, paralon ukuran $\frac{1}{2}$ inch dan sambungannya (*knee, sock* dan *T drat*), *shower* dan krannya, serta kayu penggantung *shower* dari reng 3 x 4 cm serta tali rafia untuk mengikatnya.



Gambar 3.9. Beberapa perlengkapan untuk merakit instalasi hujan simulator, yaitu kunci inggris, kran, seal tape, obeng dan klem selang (dari atas ke bawah)

Selain bahan diatas, juga diperlukan peralatan pendukung seperti obeng, kunci inggris, gergaji, paku dan palu.

Sebelum dijelaskan bagaimana membuat instalasi hujannya, bentuk instalasi hujan simulasi tersebut dapat dilihat pada gambar berikut ini, dimulai dari sumber air ke benda uji.



Gambar 3.10. Gambar Simulasi Hujan

Keterangan:

- | | |
|---------------------------|-----------------|
| 1. Kran air di gedung PAF | 6. Watermeter |
| 2. cincin selang | 7. Knee 0,5" |
| 3. Selang berserat 5/8" | 8. T drat 0.5" |
| 4. Nepel selang | 9. Kran shower |
| 5. Sock drat dalam 0,5" | 10. Hand shower |

Sumber air akan keluar dari kran air yang terbuat dari besi berukuran $\frac{1}{2}$ inch. Kran besi dipilih karena selanjutnya akan disambungkan dengan selang air berbahan plastik berserat berukuran diameter $\frac{5}{8}$ inch sepanjang ± 50 m. Selang ini bermerk *PUSO PVC HOSE* berkualitas ISO 9001:2000 certified (*SGS Yarsley, cert : QID00020*). Penggunaan selang berserat ini bertujuan agar kuat bila terinjak maupun terlindas oleh kendaraan yang melewati daerah sekitar penelitian dilakukan.

Pipa paralon PVC bermerk *wavin* tipe AW digunakan sebagai penghubung sebagai penghubung meteran air (*water meter*) dengan selang dari sumber air. Pipa, meteran dan selang dihubungkan dengan sock drat dalam. Sambungan pada pipa PVC dapat pula menggunakan lem khusus untuk material PVC, misalnya lem Isarplas. Sama halnya dengan fungsi perekat lainnya, lem ini berfungsi untuk menguatkan sambungan pada pipa agar aliran air tetap terjaga atau tidak bocor.

Pembuatannya dibagi menjadi dua tahap. Tahap pertama adalah perakitan pipa hingga shower dan kedua adalah penginstalan pipa shower pada model fisik jalan saat akan dilakukan pengukuran hujan simulasi.

Tahap pertama, satu batang pipa $\frac{1}{2}$ inch sepanjang 4 m dipotong menjadi empat bagian menjadi sepanjang 1 m. Tiga bagian disambungkan dengan dua buah *T drat*. Salah satu ujung pipa disambungkan dengan *knee drat*. *Knee* dan dua buah *T drat* ini merupakan

sambungan ke kran *shower*. Ujung pipa yang lain disambungkan dengan *knee* agar berbelok ke bawah untuk disambungkan ke pipa $\frac{1}{2}$ inch yang 1 m terakhir. Pipa tegak ini berfungsi untuk meninggikan posisi kran agar ± 1 m berada di atas permukaan model fisik jalan

Selanjutnya, bagian bawah pipa tegak disambungkan dengan pipa $\frac{1}{2}$ inch yang menuju meteran air dengan *knee*. Pipa sambungan ini menyambung pada meteran air dengan menggunakan *sock drat*. Meteran air merupakan salah satu alat pengukur debit aliran. Alat ini bermanfaat berfungsi untuk mengetahui variasi besar aliran per satuan waktu yang melewati pipa sebelum keluar dari mulut *shower* atau intensitas hujan simulasi yang terjadi. *Water meter BR*¹⁵, merupakan tipe alat ukur jenis magnet yang diperuntukkan bagi air dingin dan sesuai dengan ISO (*International Standard Organization*) 4064.

Meteran air memiliki *sock drat* tersendiri yang bisa disambungkan dengan *sock drat* $\frac{1}{2}$ inch. Sisi lain dari meteran air selanjutnya disambungkan dengan selang yang langsung dari kran sumber air. Kran dan *sock drat* berukuran $\frac{1}{2}$ inch disambungkan dengan selang $\frac{5}{8}$ inch. Untuk mempererat sambungan pada bagian luar selang yang dimasukkan ke kran maupun nepel selang, digunakan klem atau cincin selang. Untuk mengubah ukuran cincin selang digunakan obeng.



Gambar 3.11. Pemasangan cincin selang pada kran sumber air

Selanjutnya, selang tadi dihubungkan ke pipa paralon dengan sambungan berupa nepel selang yang terhubung dengan *sock drat* dalam. Setiap sambungan yang berhubungan langsung dengan selang, digunakan cincin selang agar dapat terkait erat. Nepel selang dan kran plastik berukuran diameter $\frac{1}{2}$ inch, sedangkan selang berukuran diameter $\frac{5}{8}$ inch. Cincin selang berfungsi untuk menjaga sambungan agar tidak lepas yang menyebabkan

¹⁵ Under License of Bopp & Reuther Germany

keluarnya air dari sambungan. Cincin selang biasa digunakan pada sambungan polos atau tidak berulir.

Nepel selang memiliki dua sisi yang berbeda, yaitu polos dan berulir. Sambungan nepel selang pada bagian berulir dengan sock drat dalam ditambahkan dengan lilitan *seal tape* untuk mencegah keluarnya air dari sela-sela bagian berulir. Satu unit *PTFE Thread Seal Tape* memiliki beberapa tipe ukuran. Pada percobaan ini digunakan *seal tape* berukuran 12mmx0,075mmx10m.

Setiap sambungan direkatkan digunakan *seal tape* dan lem pvc. Lem pvc digunakan untuk setiap sambungan bahan yang berjenis pvc dan *seal tape* yang digunakan dengan cara dililit, digunakan pada setiap sambungan berupa ulir. Gambar instalasi hujan untuk pengukuran dengan hujan simulasi dapat dilihat pada gambar berikut ini.



Gambar 3.12. Instalasi hujan simulasi

III.3.3. Alat CBR

Untuk mengukur CBR tanah dasar pada kondisi jenuh, digunakan peralatan yang mengacu pada SNI 03-1738-1989, diantaranya:

- dongkrak CBR mekanis dengan kapasitas 10 ton, dilengkapi dengan σ wivel head dan alat pengukur beban, cincin penguji (proving ring) dengan kapasitas 1,5 ton, 3 ton, 5 ton atau sesuai dengan kebutuhan
- 2 buah arloji penunjuk untuk mengukur penetrasi dengan ketelitian 0,01 mm atau 0,001ö dilengkapi balok penyokong dari besi profil sepanjang lebih kurang 2,5 meter.

- Keping beban yang bergaris tengah 25 cm atau 10ö berlubang di tengah dengan berat 5 kg atau 10 lb dan beban-beban tambahan seberat 2,5 kg atau 5 lb yang dapat ditambahkan bila perlu
- Sebuah truk yang dibebani sesuai dengan kebutuhan dan di bawahnya dapat dipasang sebuah dongkrak CBR mekanis
- Dua dongkrak truk, alat penggali, alat-alat penumbuk, alat-alat perata dan lain-lain.



Gambar 3.13. Alat ukur dari pengukuran CBR lapangan

III.3.4. Persiapan Material

Persiapan material dilakukan di lokasi penelitian. Agregat yang akan digunakan sebagai lapisan perkerasan didatangkan lalu ditempatkan di sekitar lokasi. Agar material tidak saling tercampur, material dipisahkan dan dimasukkan ke dalam karung plastik. Adapaun material yang harus dipersiapkan untuk penelitian ini adalah :

III.3.4.1. Pasir dan Agregat

Untuk mendapatkan spesifikasi material pasir dan agregat, diperlukan kegiatan pengayakan. Menurut standar ASTM, pasir memiliki butiran berkisar antara 4,75-0,075 mm atau dapat lolos saringan no. 4 dan tertahan di saringan no. 200. Pasir yang digunakan merupakan jenis pasir hitam. Untuk kebutuhan pembuatan model fisik jalan, dibutuhkan pasir setebal 15 cm untuk luasan area 3m² yaitu 0,45 m³. Untuk menghindari kekurangan material, pasir yang disediakan sebaiknya melebihi 0,5 m³. Penyarangan akan dilakukan dengan cara manual.

Sedangkan untuk campuran beton berpori digunakan agregat kasar dengan ukuran butir ¾ö, yaitu agregat lolos saringan 1ö dan tertahan saringan ¾ö. Jumlah

agregat yang diperlukan adalah sebesar 702 kg dan pasir sebesar 36,8 kg. Untuk menghindari kekurangan material, bahan yang dipersiapkan dlebihkan dari yang dibutuhkan.

Untuk mengefektifkan pengerjaan digunakan saringan berukuran $\pm 1 \text{ m}^2$. Saringan ini terbuat dari reng (3×4) cm^2 , list plafon polos selebar 4 cm dan saringan kawat berukuran $\pm 0,5$ cm sepanjang 1 m. Saringan kawat yang tersedia di toko material biasanya memiliki lebar 90 cm dan sebatang reng kayu memiliki panjang $\pm 3,8$ m serta sebatang plafon sepanjang 4 m. Pembuatan saringan ini dilakukan dengan pemotongan reng dan plafon menjadi 4 bagian, yaitu 0,95 m untuk reng dan 1 m untuk plafon. Selanjutnya reng disambungkan dengan paku 5 cm. List plafon berfungsi sebagai pengapit saringan kawat agar menempel pada bingkai reng. Pengait yang digunakan adalah paku 3 cm yang dipalu di sekeliling bingkai reng. Panjang list plafon yang berlebih, dipotong menggunakan gergaji kayu.

Agregat yang digunakan agregat #4 atau tertahan di saringan no.4 AASHTO, namun karena di departemen teknik sipil bahkan di semua laboratorium jurusan di teknik menggunakan standar ASTM, maka digunakan standar ASTM untuk ukuran saringannya. Agregat #4 merupakan agregat yang lolos saringan no. 3/8 yang berukuran 9,5 mm namun tertahan di saringan no.4 yang berukuran 4,75 mm.

Agregat yang dibutuhkan setebal 20 cm seluas 3 m^2 , yaitu 0,6 m^3 . Peyerangan juga dilakukan secara manual dengan saringan yang dibuat sendiri.

Bahan-bahan yang diperlukan untuk pembuatan saringan agregat sama dengan saringan pasir. Untuk agregat dibutuhkan dua jenis saringan. Saringan pertama berfungsi untuk mendapatkan agregat lolos no. 3/8. Yang tersedia di pasaran, saringan ini berukuran hampir 1 cm dan hanya saringan kawat ini yang memiliki ukuran mendekati 9,5 mm. Saringan kedua untuk mendapatkan agregat yang tertahan di saringan no. 4 yaitu sama dengan saringan pasir. Untuk membuat saringan ini dapat berdiri, digunakan 2 batang potongan reng 3 x 4 cm.



Gambar 3.14. Saringan yang digunakan untuk meloloskan agregat

Penyaringan atau pengayakan dilakukan dengan sekop dan sendok semen kecil. Material yang sudah sesuai dengan spesifikasi rencana, dimasukkan ke dalam karung-karung dan disimpan di tempat yang terhindar dari hujan. Khusus untuk material agregat, agar memudahkan mobilisasi, baik saat pembelian agregat maupun untuk operasional di lapangan, material ini diletakkan dekat dengan lokasi pembuatan model fisik jalan. Untuk menghindarinya dari hujan, tumpukan material ini ditutupi dengan terpal 4 x 6 m².



Gambar 3.15. Sekop, karung-karung berisi agregat #4 dan terpal pelindung hujan

Pasir dan agregat juga dibutuhkan untuk pembuatan lapisan perkerasan. Untuk pembuatan *pervious concrete*. Sehingga pasir dan agregat yang disediakan dihitung untuk keperluan *pervious concrete* juga.

III.3.4.2. Pipa Perforated

Pipa yang digunakan harus berlubang-lubang untuk memungkinkan terkumpulnya air yang terinfiltrasi. Pipa berukuran 4 *inch* ini dapat dilubangi dengan

2 cara, diiris selebar ± 5 cm dengan gergaji besi hingga memiliki celah ± 2 mm atau dengan cara dibor. Alternatif yang dipilih adalah pengeboran untuk mempersingkat waktu. Posisi lubang bor masing-masing berjarak ± 4 cm pada satu baris dan setiap barisnya berjarak ± 2 cm. Karena mata bor terkecil yang dimiliki hanya 5 mm, maka diperlukan kain kasa yang dililit di seluruh batang pipa. Kain kasa berfungsi untuk memperkecil lubang-lubang pada pipa. Lilitan dilakukan sebanyak ± 3 lapis. Panjang pipa yang dibutuhkan ± 1 m.



Gambar 3.16. Pipa berlubang dibungkus dengan kain kasa dan disambung dengan knee

III.3.4.3. Geotekstil

Penyiapan material geotekstil dilakukan dengan memotongnya dengan gunting menjadi lembaran-lembaran sesuai dengan desain rencana. Geotekstil non-woven yang digunakan untuk pembatas antara pasir dan agregat digunakan seluas 3 m² dengan ukuran 3 x 1 m. Sementara itu geotekstil nonpermeable yang dibutuhkan untuk penutup samping model agar tidak terpengaruh tanah dasar disampingnya dibutuhkan dengan panjang 8 meter dan lebar ± 75 cm tergantung dari tebal lapisan perkerasan yang akan dibuat.

III.3.4.4. Semen

Penyiapan material semen dilakukan apabila akan melakukan pengecoran. Semen yang digunakan adalah semen tipe I yang banyak dijual bebas di pasaran. Semen tipe ini terdapat berbagai macam merek, namun yang digunakan dalam pembuatan material ini semen dengan merek tiga roda.

III.4. PROSEDUR PENELITIAN

III.4.1. Persiapan Lahan

Lahan yang akan dijadikan tempat penelitian yang terletak di lahan parkir gedung PAF telah menjadi tempat penelitian skripsi Dian Indah Purnamasari. Penelitian Dian yang mengukur laju infiltrasi dan daya dukung tanah dasar menggunakan lapisan permukaan grassblock meninggalkan lokasi penelitian yang masih terbengkalai. Pada lokasi ini telah diinstal model jalan permeabel. Pada kondisi yang telah ada, hal pertama yang akan dilakukan adalah membongkar kembali model konstruksi jalan yang telah ada. Pada penelitian ini akan dilakukan pemasangan 2 model yang akan dilakukan bergantian.

Setelah lahan dibersihkan dari bekas-bekas penelitian yang lalu, hal pertama yang akan dilakukan adalah memasang angkur yang dimaksudkan untuk mengukur CBR lapangan pada kondisi jenuh dari model fisik permeabel pavement ini. Hal ini dilakukan terlebih dahulu dengan pertimbangan pada penelitian Dian (Dian, 2007) nilai CBR lapangan pada kondisi jenuh tidak dapat diukur karena pada angkur yang telah dipasang untuk mengukur CBR lapangan setelah konstruksi selesai dicabut, sehingga ketika akan dilakukan pengukuran untuk pada kondisi jenuh angkur tidak dapat dipasang karena kondisi model yang tidak memungkinkan untuk memasang kembali angkur.

Angkur dipasang pada sisi pendek dari model fisik. Angkur yang akan dipasang direncanakan adalah angkur yang bersifat permanen agar tidak hilang apabila model ditinggalkan pada malam hari. Pertimbangan lainnya adalah pengukuran laju infiltrasi yang tidak bisa dilakukan dalam 1 hari dan pengukuran CBR lapangan yang dilakukan setelah model jenuh air, sehingga apabila angkur dipasang setelah pengukuran laju infiltrasi dilakukan, maka akan menyulitkan dalam pemasangannya karena kondisi tanah yang becek.

Untuk melakukan instalasi model fisik, dilakukan penggalian sesuai dengan kedalaman tertentu, barulah kemudian dilakukan instalasi model fisik. Apabila kedalaman yang telah ada melebihi kedalaman yang diharapkan, maka dilakukan penimbunan kemudian dilakukan pemadatan pada tanah dasarnya.

Kedalaman lahan yang akan dipasang konstruksi model fisik ini disesuaikan dengan tebal perkerasan yang akan dibuat.

III.4.2. Persiapan Alat Ukur dan Batasan Pengukuran

Ditinjau dari pengukuran yang akan dilakukan, maka diperlukan batasan untuk mendapatkan data sesuai dengan analisa yang akan dilakukan. Untuk itu diperlukan bangunan pelengkap untuk membatasi hal tersebut. Adapun bangunan-bangunan pelengkap yang dibutuhkan antara lain:

- bangunan pembendung dan pengalihan aliran limpasan wilayah sekitar penelitian
- dinding di sekeliling model setinggi ± 1 m sebagai pembatas rainfall, baik hujan simulasi maupun alami, agar yang terjadi berupa hujan sistem pada model fisik jalan
- penggantung kran shower dari instalasi simulator hujan
- lubang pengambilan data sampel debit limpasan dan infiltrasi
- selokan sementara untuk pengambilan data sampel debit limpasan dan
- angkur permanen yang dipasang di kedua sisi model fisik jalan sebagai dudukan kanal penahan beban untuk pengukuran daya dukung jalan sebelum dan sesudah terjadinya infiltrasi.

III.4.3. Pembuatan Lapisan Perkerasan Atas Model Fisik

Dalam pembuatan lapisan perkerasan atas yang terbuat dari beton, tahapan pembuatannya adalah:

- Mempersiapkan material seperti agregat, pasir dan semen sesuai dengan kebutuhan.
- Mempersiapkan alat kompaktor, molen dan bekisting untk pencetakan. Bekisting yang digunakan berukuran 50 x 50 x 13 cm.
- Melakukan pengadukan agregat, pasir dan semen dengan jumlah sesuai mix design di dalam molen.
- Memindahkan campuran kedalam cetakan. Setelah itu dilakukan penumbukan dengan alat kompaktor sebanyak 75 kali per layer. Untuk 1 buah bekisting terdapat 2 layer.

III.4.4. Instalasi Model Fisik

Pelaksanaan konstruksi model fisik dilakukan dengan pemasangan alat bantu yang akan digunakan dalam penelitian. Adapun tahapan pemasangan model fisik antara lain :

- ❖ pemasangan angkur di kedua sisi model fisik jalan yang jaraknya memadai sesuai panjang kanal yang tersedia

- ❖ Penggalan tanah untuk konstruksi sesuai kedalaman yang diharapkan (kedalaman dikurangi 10 cm dari desain rencana dengan asumsi pada saat pemadatan kedalaman menjadi berkurang).
- ❖ Tanah dasar dipadatkan dengan stamper
- ❖ Tanah diratakan sesuai dengan desain rencana
- ❖ Pemasangan kanal penahan beban untuk uji CBR tanah dasar
- ❖ Uji CBR tanah dasar
- ❖ Pemasangan geotekstil *impermeable liner* di seluruh sisi galian pondasi
- ❖ Pipa berlubang di letakkan di dasar pondasi terendah dengan 2/3 kedalamannya diisi agregat.
- ❖ Material pasir dimasukkan setebal disain rencana.
- ❖ Lapisan pasir dipadatkan dengan stamper
- ❖ Kanal penahan beban dipasang kembali untuk pengujian CBR Pasir
- ❖ Uji CBR lapisan pasir
- ❖ Pemasangan geotekstil *non-woven* menutupi seluruh lapisan permukaan pasir
- ❖ Material agregat dimasukkan setebal disain rencana
- ❖ Lapisan agregat dipadatkan dengan stamper
- ❖ Kanal penahan beban dipasang untuk pengujian CBR
- ❖ Uji CBR lapisan agregat
- ❖ Karpet merah hitam (*impermeable*) dipasang di luar geotekstil *impermeable liner*.
- ❖ Pemasangan lapisan perkerasan atas
- ❖ Bambu dipasang di sisi-sisi model fisik untuk menjamin karpet merah *impermeable* dapat berdiri tegak agar tidak model fisik dapat dibatasi.
- ❖ Bambu diikat dengan karpet merah
- ❖ gali tanah di sebelah model fisik, tepatnya pada sisi keluaran infiltrasi dan limpasan sebesar orang pengambil data sampel saat pengukuran (ukuran 0,5 x 0,5 m)
- ❖ gali tanah di sebelah model fisik di sisi terendah di bagian atas pipa untuk selokan sementara dengan ukuran lebar 10 cm dan kedalam 5 cm
- ❖ alas galian tersebut dengan geotekstil *impermeable liner* dengan posisi geotekstil yang memanjang hingga menjulur ke luar sepanjang ± 15 cm
- ❖ pengambilan data pengukuran daya infiltrasi dapat dilakukan.

catatan : Pada setiap pengukuran nilai CBR di lapangan, Jika nilai CBR lebih kecil dari rencana desain, lakukan pemadatan kembali dengan stamper. Namun, jika masih kurang, lakukan modifikasi tebal perkerasan pada lapisan material penyusun.

III.4.5. Pengukuran Daya Infiltrasi

Uji kapasitas infiltrasi dapat dilakukan dengan dua sumber hujan yaitu hujan alami dan hujan simulasi. Untuk hujan alami, tidak diperlukan pencatatan debit hujan. Data curah hujan dapat diketahui dari pencatatan alat ukur hujan yaitu stasiun hujan yang terpasang di dekat lokasi penelitian. Untuk hujan simulasi, debit hujan dapat diketahui dengan pencatatan volume yang tertera pada meteran air (water meter) setiap waktu tertentu. Meteran air merupakan alat pada instalasi simulator hujan yang berfungsi untuk mengetahui besar debit yang telah melalui alat tersebut. Untuk pengambilan sampel data infiltrasi dan limpasan, baik pada pengukuran dengan hujan alami maupun buatan, caranya sama. Air limpasan dari selokan sementara dan infiltrasi dari yang keluar dari knee pipa ditampung dengan plastik sebagai wadah sementara.

Pengukuran limpasan dan infiltrasi dilakukan sampai aliran limpasan dan infiltrasi benar-benar berhenti. Pengukuran debit hujan atau curah hujan dilakukan selama satu periode hujan. Sampel-sampel limpasan dan infiltrasi yang telah tertampung pada wadah sementara, selanjutnya diukur volumenya dengan menggunakan gelas ukur.

III.4.5.1. Pengukuran dengan hujan simulasi

- 1) pasang selang instalasi simulator hujan ke kran sumber air
- 2) hubungkan ujung selang lainnya ke sambungan meteran air (water meter)



Gambar 3.17. Sambungan selang dengan meteran air untuk instalasi hujan simulasi

- 3) buka kran sumber air hingga air keluar di kran *shower*.
- 4) gantungkan pipa kran *shower* pada kayu reng yang telah dirakit dan membentang di atas model fisik jalan.



Gambar 3.18. Model instalasi hujan simulasi

- 5) catat volume awal yang tertera pada meteran air (water meter)
- 6) pasang plastik di ujung selokan sementara dan di ujung *knee* pipa
- 7) nyalakan stopwatch tepat pada saat pertama kali *rainfall* terjadi pada model fisik jalan;
- 8) ganti plastik setiap waktu tertentu agar didapat debit limpasan maupun infiltrasi yang terjadi;
- 9) lakukan penadahan air limpasan dan infiltrasi sampai alirannya benar-benar berhenti;
- 10) ukur dan catat volume air dari setiap sampel data yang didapat.
- 11) Pengukuran dilakukan sesuai banyaknya data yang diinginkan.

III.4.5.2. Pengukuran dengan hujan alami

- 1) Cek tinta, gelas ukur dan millimeter blok pada stasiun hujan.
- 2) Pasang plastik di ujung selokan sementara dan di ujung *knee* pipa.
- 3) Nyalakan *stopwatch* saat pertama kali *rainfall* terjadi di model fisik jalan dan pada saat itu pula dimulai pencatatan pada stasiun hujan
- 4) Plastik penampung diganti pada waktu tertentu kemudian air yang tertampung plastik diukur volumenya kemudian dicatat.
- 5) Lakukan terus penampungan air di plastik sampai aliran air benar2 berhenti.

Pada pengukuran infiltrasi dengan menggunakan hujan buatan, maka dibutuhkan pencatatan kapasitas hujan dan besarnya infiltrasi yang terjadi. Data yang dicatat adalah menitan. Dapat dilihat pada tabel berikut:

Tabel 3.8. Tabel rencana pengambilan data hujan

<i>t (mnt)</i>	<i>Q (ml)</i>	<i>H (ml)</i>
0		
1		
2		
:		
:		
n_k		

III.4.6. Pengukuran CBR Lapangan

Pengukuran CBR lapangan dilakukan dengan *Mechanical Jack*, yaitu dengan bantuan angkur dan kanal. Pertama-tama dilakukan pemasangan angkur di kedua sisi terpendek model fisik jalan, yaitu pada sisi 1 m. Hal ini diindikasikan dengan hanya tersedianya kanal terpanjang sepanjang 1,25 m. Pemasangan angkur dilakukan dengan *hand boring* yang dilakukan secara manual dengan kira-kira 3 orang dewasa. Selanjutnya, di atas kedua angkur tersebut dipasang kanal yang dikaitkan dengan mur yang sesuai ukurannya. Kanal ini berfungsi sebagai penahan beban saat dilakukan penetrasi untuk pengujian nilai CBR.

Uji CBR lapangan dilakukan pada lapisan tanah dasar, pasir dan agergat. Pengujian dilakukan saat pelaksanaan konstruksi dan setelah pengukuran daya serap dilakukan agar diketahui perubahan daya dukung yang terjadi akibat hujan.

Untuk pengukuran CBR lapangan setelah terjadinya infiltrasi hanya diambil satu sampel dengan cara membongkar lapisan di atasnya sebelum dilakukan pengukuran. Sehingga data CBR setelah infiltrasi hanya didapatkan 1 data dan pengukuran CBR setelah infiltrasi dilakukan terakhir sebelum model fisik dibongkar.

BAB IV

PEMBUATAN BENDA UJI DAN PENGOPERASIAN MODEL FISIK KONSTRUKSI JALAN *PERMEABLE PAVEMENT*

Pada bagian ini akan diuraikan beberapa tahapan yang dilakukan untuk pembuatan benda uji serta pengukuran daya serap dan daya dukung dari jalan permeabel. Kegiatannya meliputi pelaksanaan konstruksi untuk pembuatan model fisik jalan *permeable*, instalasi pengukuran untuk intensitas hujan simulasi, infiltrasi dan limpasan sampai pengoperasian alat ukur.

Dalam setiap tahapan pekerjaan di lapangan akan disertai dengan proses, evaluasi terhadap penyesuaian lapangan yang diperlukan dan catatan terhadap hambatan, kegagalan atau peningkatan dari kinerja. Selanjutnya pada bagian akhir akan ditampilkan pengolahan data hasil pengukuran, baik pengukuran daya serap maupun daya dukung dari model fisik *permeable pavement*.

IV.1. PEMBUATAN *PERVIOUS CONCRETE* SEBAGAI LAPISAN PERKERASAN ATAS

Dalam pembuatan *pervious concrete* dibagi dalam 2 bagian. Pertama adalah persiapan alat dan material dan kedua adalah bagian pembuatan dari *pervious concrete*. Pembuatan beton berpori ini dilakukan di laboratorium bahan Fakultas Teknik. Persiapan material yang dilakukan antara lain menyaring agregat sesuai dengan spesifikasi yang ditentukan. Bahan yang dibutuhkan antara lain Agregat ukuran $\frac{3}{4}\phi$, Agregat halus lolos saringan no.4, air dan semen. Sedangkan alat-alat yang digunakan antara lain molen, kayu balok sebagai perata, compactor dan bekisting atau cetakan beton ukuran 50 x 50 x 13 cm.

Sebelum dilakukan *mix design* atau perhitungan rancang campur dilakukan perhitungan properti material. Untuk kondisi ini percobaan yang dilakukan hanya menghitung berat jenis dari agregat kasar dan agregat halus yang digunakan. Setelah dilakukan pengujian di laboratorium, didapatkan berat jenis ssd dari agregat kasar adalah 2,52 kg/m³.

Adapun rancang campur dan bahan-bahan yang digunakan dalam pembuatan dapat dilihat pada tabel berikut:

Tabel 4.1. Mix design

Bahan	mix design	untuk 1m ³ camp		Berat (Kg)
Aggregat Kasar	1	0.7142857	m3	1800.00
Cement	0.25	0.1785714	m3	562.50
Sand	0.05	0.0357143	m3	92.50
W	0.1	0.0714286	m3	71.43
Jumlah	1.4	1	m3	

Pada proses pembuatan, nilai *slump* yang diinginkan adalah 0, sehingga sangat sulit dalam pencetakan beton kedalam bekisting yang berukuran 50 x 50 x 13 cm. Untuk itu dilakukan dengan cara pemadatan dengan menggunakan alat compactor. Gambar Alat *Compactor* dan bekisting yang digunakan dapat dilihat pada gambar dibawah ini.



Gambar 4.1. Alat kompaktor (Kiri) dan bekisting serta pervious concrete (kanan)

Proses pencampuran dilakukan dengan melakukan molen. Agregat yang digunakan adalah yang kering permukaan. Urutan pekerjaan adalah memasukkan agregat kasar, agregat halus dan semen ke dalam molen. Lalu dilakukan pengadukan. Karena air yang digunakan sangat sedikit, air dimasukkan terakhir untuk memastikan pencampuran terjadi secara sempurna. Pada kasus-kasus tertentu, dilakukan penambahan air dari yang seharusnya dimasukkan. Karena belum tercampur secara sempurna dan dibutuhkan air untuk memudahkan pencampuran.

Dalam membuat 1 beton ukuran 50x50x13 cm diperlukan 2 kali pengadukan. Hal ini dilakukan karena komposisi air yang digunakan dalam pengadukan ini sangat sedikit sehingga campuran ini sangat sulit dibentuk dan mudah mengering. Nilai slump campuran adalah 0. Dapat dilihat bahwa *workability* dari campuran ini sangat kecil. Sehingga dilakukan pencampuran 2 kali. Jika pencampuran dilakukan 1 kali untuk 1 bekisting atau untuk ukuran 50x50x13 cm maka akan terjadi kesulitan-kesulitan seperti susahnya campuran tercampur secara sempurna, kesulitan dalam pencetakan dan cepatnya campuran mengering.

Untuk alasan yang cepatnya beton mengering, dalam 1 bekisting dibuat menjadi 2 layer yang pada setiap layernya dilakukan pemadatan dengan menggunakan alat *compactor*. Oleh karena itu jika dilakukan pencampuran lalu campuran dibagi kedalam 2 layer, maka untuk campuran pada layer kedua kadar air campuran akan sangat kecil dan susah untuk dibentuk. Bahkan bisa terjadi pengerasan dari campuran sehingga tidak dapat digunakan lagi.

Setelah dilakukan pencetakan, campuran dibiarkan dalam bekisting selama 1 hari dan keesokan harinya dibuka. Kemudian dilakukan pengujian sederhana apakah beton yang dicetak dapat meloloskan air. Hasil pengujian semua blok beton dapat meloloskan air dari pori yang terdapat pada beton. Dapat dilihat pada gambar dibawah ini.



Gambar 4.2. Pengujian sederhana kelulusan air beton.

Banyaknya blok beton yang dibutuhkan adalah 12 buah. Sesuai dengan ukuran dari benda uji yang akan dibuat. Jadi untuk membuat semua beton dilakukan 24 kali pencampuran. Hasil dari beton tersebut dapat dilihat pada gambar berikut.



Gambar 4.3. *PerVIOUS concrete*

Dalam pembuatan beton berpori ini, tidak dilakukan pengukuran kekuatan dari beton. Nilai kekuatan beton dianggap sama dengan hasil penelitian Roy Immanuel (2008) karena rancang campur yang digunakan adalah hasil percobaan dari peneliti tersebut. Nilai kekuatan yang dimiliki oleh beton berpori dengan rancang campur tersebut berdasarkan hasil pengujian antara lain sebagai berikut: nilai *permeability* 0,82 cm/s, kuat tekan 24,84 MPa dan kuat lentur 1,45 MPa.

Pada tahapan ini, kesalahan yang dilakukan adalah tidak dilebihkannya agregat kasar sehingga tidak dapat dibuat campuran beton untuk pengujian kuat tekan, kuat lentur dan uji *permeability*. Akibatnya dalam penelitian ini, nilai kekuatan diambil dari penelitian yang telah ada. Hal ini tidak dibenarkan karena beton memiliki karakteristik yang berbeda. Nilai kekuatan beton tidak sama dalam setiap pengadukan, namun masih dianggap dalam kisaran yang tidak jauh dari kekuatan hasil pengujian sebelumnya.

IV.2. PELAKSANAAN KONSTRUKSI MODEL FISIK JALAN *PERMEABLE*

Pelaksanaan konstruksi dibagi menjadi dua bagian, yaitu pembuatan model fisik konstruksi dari struktur jalan dengan perkerasan permeabel dan instalasi simulator hujan jika yang akan dilakukan adalah pengukuran hujan simulasi. Pengukuran tidak hanya dapat dilakukan untuk hujan simulasi, namun juga hujan alami. Pengukuran dengan hujan alami dapat dilakukan dengan adanya stasiun hujan, yaitu alat pengukur hujan, baik yang manual maupun otomatis. Stasiun hujan harus terletak di daerah sekitar lokasi penelitian. Pada penelitian ini, stasiun hujan terletak di depan Gedung Dekanat FTUI, yang terletak tidak jauh dari lokasi penelitian.

IV.2.1. Model Fisik Struktur Jalan *Permeable Pavement*

Pada Area yang akan dibuat jalan *permeable* telah ada bekas penelitian sebelumnya, sehingga dalam mengerjakan model fisik diperlukan pembersihan terlebih dahulu. Setelah dilakukan pembersihan, kemudian dilakukan pengukuran untuk memastikan cukupnya material dan beton. Karena ukuran yang lebih besar dari seharusnya menyebabkan material yang digunakan menjadi berkurang. Setelah dipastikan ukuran dari jalan *permeable*, maka dilakukan stabilisasi terhadap tanah dasar.

Stabilisasi dilakukan dengan menggunakan lapisan kapur. Pada tahapan ini lapisan kapur hanya dihamparkan ke tanah dasar seperti pada gambar. Lalu dibiarkan selama lebih kurang 1 hari. Tebal lapisan kapur adalah sekitar 10 cm setelah dipadatkan. Hal ini dimaksudkan agar kadar air yang terkandung dalam lapisan tanah dasar berkurang sehingga terjadi peningkatan nilai CBR dari tanah dasar yang telah distabilisasi. Sebelum dihamparkan, pada bagian pinggir, di sekeliling dinding benda uji dipasang lapisan geotekstil *impermeable* sebagai control volume.

Tahapan stabilisasi ini tidak sesuai dengan tahapan stabilisasi yang telah ditetapkan menurut standar yang ada. Sehingga pelapisan ini tidak dapat bekerja sesuai dengan perencanaan untuk mengurangi kelulusan air ke tanah dasar. Kadar air yang tidak terukur sebelum dan sesudah stabilisasi, persentase tanah dan kapur yang tidak terukur dan tata cara yang tidak sesuai dengan semestinya menyebabkan stabilisasi ini tidak dapat dikatakan sebagai sebuah stabilisasi tanah dasar. Seharusnya proses dan tahapan stabilisasi ini merujuk pada buku *lime soil stabilization* yang dikeluarkan oleh Departemen Pekerjaan Umum.



Gambar 4.4. Lapisan kapur sebelum dipadatkan

Setelah itu, dilakukan pemasangan angkur untuk pemeriksaan CBR lapangan yang akan diperuntukkan bagi tanah dasar, lapisan pasir dan lapisan agregat. Angkur dipasang di kedua sisi galian terpendek, yaitu berjarak ± 1 m.



Gambar 4.5. Angkur dan kanal 1,25 m sebagai penahan beban



Gambar 4.6. Pemasangan angkur di kedua sisi galian untuk pemeriksaan CBR lapangan

Pemasangan angkur dilakukan dengan cara mengebor tanah secara manual. Angkur diputar hingga masuk ke kedalaman tertentu sampai angkur tertanam tegak dan kokoh. Pemutaran angkur ini cukup sulit. Selain berat, kondisi tanah yang sudah tidak rata menyebabkan orang yang memutar angkur kesulitan untuk berjalan memutar. Terlebih lagi, penempatan yang sangat dekat dengan tepi galian menyebabkan pemutar angkur harus berhati-hati dalam memutarnya sebab jika posisi angkur miring sedikit saja dapat menyebabkan dinding tanah longsor.



Gambar 4.7. Alat ukur dan pengukuran CBR lapangan

Untuk menghindari kelongsoran, dapat dilakukan dua alternatif. Satu diantaranya adalah pemasangan angkur dilakukan sebelum penggalian tanah untuk pondasi. Hal ini dapat memudahkan proses pemutaran angkur lebih mudah karena permukaan tanah masih rata. Alternatif kedua adalah penggunaan kanal yang cukup panjang. Pada konstruksi ini, kanal yang digunakan sepanjang 1,25 m, sedangkan lebar galian sebesar 1 m. Berarti, *space* lahan yang tersedia $\pm 12,5$ cm. Selain *space* yang tersedia begitu sempit, baling-baling angkur pun juga memiliki jari-jari yang hampir sama besar dengan jarak angkur terhadap dinding galian. Hal ini pula yang menyebabkan tanah dekat dinding pondasi menjadi gembur sehingga mudah terjadinya longsor.

Tahap selanjutnya adalah pemadatan tanah dengan *stamper*. Pemadatan dengan *stamper* dilakukan selama beberapa tahapan. Tahap pertama dilakukan sampai tanah dirasa cukup daya dukungnya dan selanjutnya diuji nilai CBR-nya. Jika belum sesuai dengan desain rencana, maka dilakukan pemadatan tahap lanjut. *Stamper* dioperasikan oleh seorang operator. Bahan bakarnya berupa bensin dan untuk mengoperasikannya sama dengan cara pengoperasian mesin parut kelapa yang terdapat di pasar-pasar tradisional yaitu dengan memutar putaran penggerakannya dengan bantuan lilitan kabel yang ditarik.



Gambar 4.8. Pemadatan tanah dengan menggunakan stamper

Setelah tanah diratakan dan dipadatkan, dilakukan pemeriksaan CBR lapangan. Tahapan selanjutnya setelah pemadatan, dilakukan pengujian nilai CBR (California Bearing Ratio) terhadap lapisan batu kapur. Nilai CBR yang didapatkan dapat dilihat pada tabel berikut. Berdasarkan tabel yang dikeluarkan oleh Army corp of Engineers dan lazim dipakai di Indonesia, nilai CBR 18,5 % termasuk kedalam rating sedang dan bisa untuk penggunaan subgrade.

Tabel 4.2. Persentase nilai CBR tanah dasar stabilisasi dengan kapur di lapangan

<i>Penetration (inch)</i>	<i>CBR (%)</i>
0,1	15,6
0,2	18,489

Selanjutnya adalah penambahan lapisan pasir sebesar 15 cm, namun sebelumnya, pada bagian ujung, seperti pada gambar desain diletakkan pipa PVC untuk mengalirkan air yang menyerap. Penambahan ini dilakukan agak berlebih dari 15 cm, sebelum dipadatkan. Setelah itu dilakukan pemadatan. Pemadatan dilakukan sampai lapisan pasir dirasa memiliki kepadatan yang cukup. Kemudian ketinggian lapisan disesuaikan menjadi 15 cm.



Gambar 4.9. Pemadatan lapisan pasir

Setelah itu dilakukan pengujian nilai CBR lapisan pasir. Nilai CBR yang didapatkan cukup tinggi, yaitu 24,3%. Proses pengujian dapat dilihat pada gambar dibawah ini. Berdasarkan tabel yang dikeluarkan oleh Army corp of Engineers dan lazim dipakai di Indonesia, nilai CBR 24,3 % termasuk kedalam rating baik an bisa untuk penggunaan base dan subbase. Hal ini sangat bagus karena tingginya nilai CBR lapisan pasir dan memiliki rating baik bagus untuk struktur jalan ini secara keseluruhan.

Tabel 4.3. Persentase nilai CBR Lapisan pasir

Penetration (inch)	CBR (%)
0,1	20,8
0,2	24,267



Gambar 4.10. Pengujian CBR Lapisan Pasir

Setelah dilakukan uji CBR untuk lapisan pasir, dipasang geotekstil *non-woven* sebagai separator dengan lapisan berikutnya. Hal ini dimaksudkan agar tidak terjadi pencampuran antara pasir dan agregat akibat pembebanan dan penghujanan. Apabila hal tersebut terjadi, akan mengganggu kekuatan dari setiap lapisan perkerasan. Lapisan *non-woven* yang berfungsi sebagai separator ini tidak dapat meloloskan butiran pasir terkecil sekalipun, namun dapat meloloskan air dengan baik. Sehingga sangat bagus untuk dijadikan separator.



Gambar 4.11. Pemasangan geotekstil non woven sebagai separator

Selanjutnya material split dengan ukuran ASTM #4 dimasukkan dalam konstruksi untuk lapisan selanjutnya. Lapisan ini didesain setinggi 20 cm, kemudian dipadatkan. Setelah pemadatan dilakukan uji CBR untuk lapisan split dengan ukuran ASTM #4 ini. Nilai CBR yang didapatkan agak mengecewakan, hanya sebesar 10,2%. Pemadatan telah dilakukan melebihi yang seharusnya, namun ukuran butir material yang seragam menyebabkan sulitnya terjadi pemadatan untuk lapisan ini. Nilai CBR ini masih memiliki rating sedang. Namun tidak baik untuk base dan sub-base, karena seharusnya base dan sub-base memiliki nilai CBR diatas 20%.

Tabel 4.4. Persentase nilai CBR Lapisan split dengan ukuran ASTM #4

Penetration (inch)	CBR (%)
1	8,666667
2	10,16889

Setelah itu dilakukan pemasangan *pervious concrete*. Seperti pada gambar dibawah ini. Pemasangan blok beton ini dilakukan dengan sangat hati-hati. Masih terdapat celah diantara blok beton ini, dikhawatirkan air yang lolos kelapisan dibawahnya bukan melalui pori yang terdapat pada beton, melainkan melalui celah yang ada. Namun pada pori di beton juga dapat mengalirkan air. Hal ini telah diuji di laboratorium dengan menggunakan pengujian sederhana seperti terlihat di gambar 4.2. Pengujian sederhana ini bertujuan untuk memastikan bahwa beton yang telah dibuat dapat mengalirkan air atau *porous*.



Gambar 4.12. Proses pemasangan *pervious concrete*

IV.2.2. Instalasi Hujan Buatan

Pada tahap ini akan dibahas mengenai pembuatan alat dan instalasi untuk hujan buatan. Peralatan instalasi hujan yang telah disambungkan dengan sumber air dipasang dengan menggunakan balok kayu. Seperti yang terlihat pada gambar, balok kayu digunakan untuk membuat pipa dan shower berdiri tegak. Bentuk balok kayu yang seperti kaki tiga dibuat agar memudahkan untuk membongkar instalasi hujan buatan dan memasangnya kembali.



Gambar 4.13. Proses pengambilan data Infiltrasi

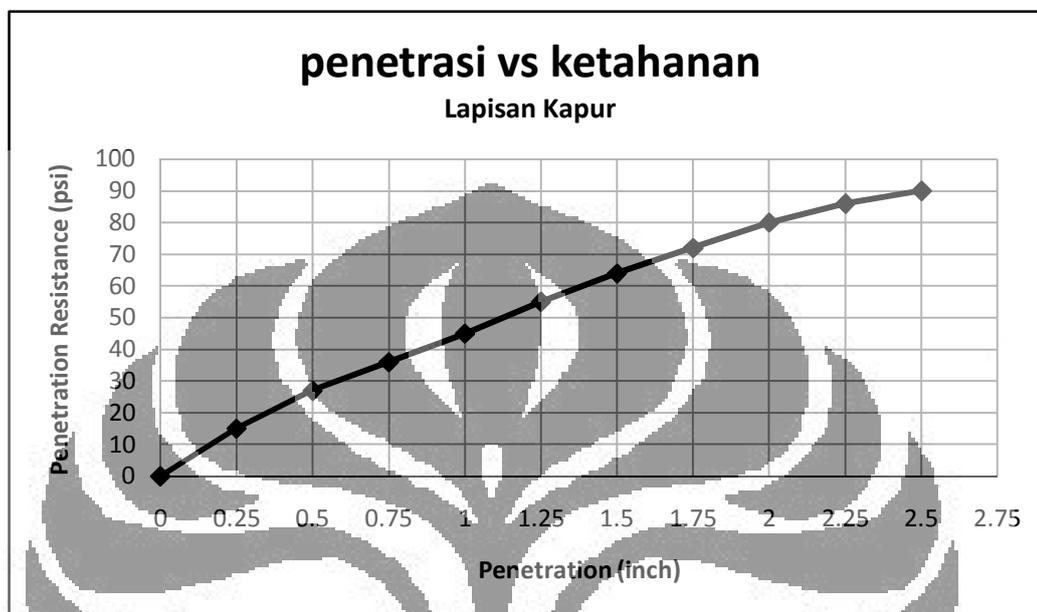
IV.3. PENGAMBILAN DATA CBR DAN INFILTRASI MODEL FISIK

IV.3.1. Pengambilan Data CBR (California Bearing Ratio) Lapangan Sebelum Infiltrasi

Hasil pengujian CBR lapangan untuk lapisan yang telah dilakukan stabilisasi jauh lebih baik. Nilai CBR lapangannya mencapai 18,4%. Namun karena kesalahan pada prosedur tidak dapat disimpulkan bahwa akibat stabilisasi telah terjadi kenaikan nilai CBR dari tanah dasar. Nilai CBR lapangan yang diambil pada penelitian sebelumnya hanya 4.24 %. Dengan bertambahnya nilai CBR dengan signifikan ini seharusnya menunjukkan bahwa stabilisasi yang dilakukan sangat berpengaruh terhadap penambahan nilai CBR, namun tidak dapat disimpulkan seperti itu. Karena tahapan yang dilakukan hanyalah penambahan lapisan kapur diatas tanah dasar. Bukan stabilisasi yang memiliki prosedur tersendiri.

Tabel 4.5. Persentase nilai CBR tanah dasar stabilisasi dengan kapur di lapangan

Penetration (inch)	CBR (%)
0,1	15,6
0,2	18,48889



Gambar 4.14. Grafik hubungan Penetrasi vs Ketahanan tanah untuk uji CBR tanah dasar stabilisasi

Tabel 4.6. Persentase nilai CBR tanah dasar di lapangan

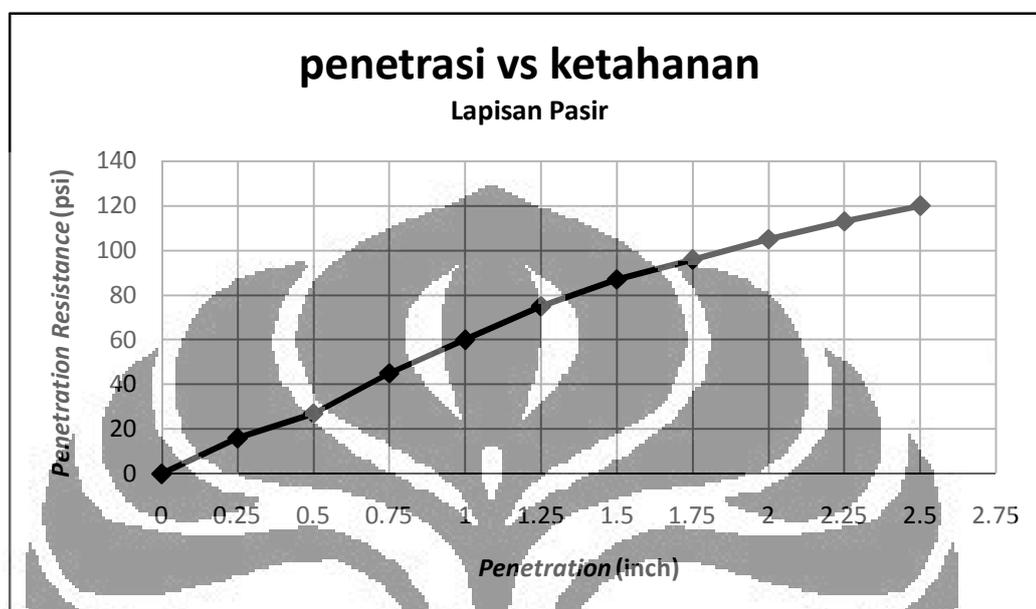
Penetration (inch)	CBR (%)
0,1	5,02
0,2	4,24

Nilai CBR yang didapatkan sangat rendah dan jauh dari hasil pengujian di laboratorium. Hal ini mungkin terjadi karena kondisi tanah yang banyak mengandung air akibat kondisi cuaca beberapa hari sebelum diuji terjadi hujan. Kondisi ini jauh dari kondisi di laboratorium yang diuji dengan kadar air optimum, sehingga nilai CBR nya didapatkan 10,8%.

Untuk lapisan selanjutnya adalah nilai CBR lapisan Pasir. Setelah itu dilakukan pengujian nilai CBR lapisan pasir. Nilai CBR yang didapatkan cukup tinggi, yaitu 24,3%.

Tabel 4.7. Persentase nilai CBR Lapisan pasir

Penetration (inch)	CBR (%)
0,1	20,8
0,2	24,2667



Gambar 4.15. Grafik hubungan Penetrasi vs Ketahanan tanah untuk uji CBR lapisan pasir

Tabel 4.8. Hasil Uji CBR pasir di laboratorium

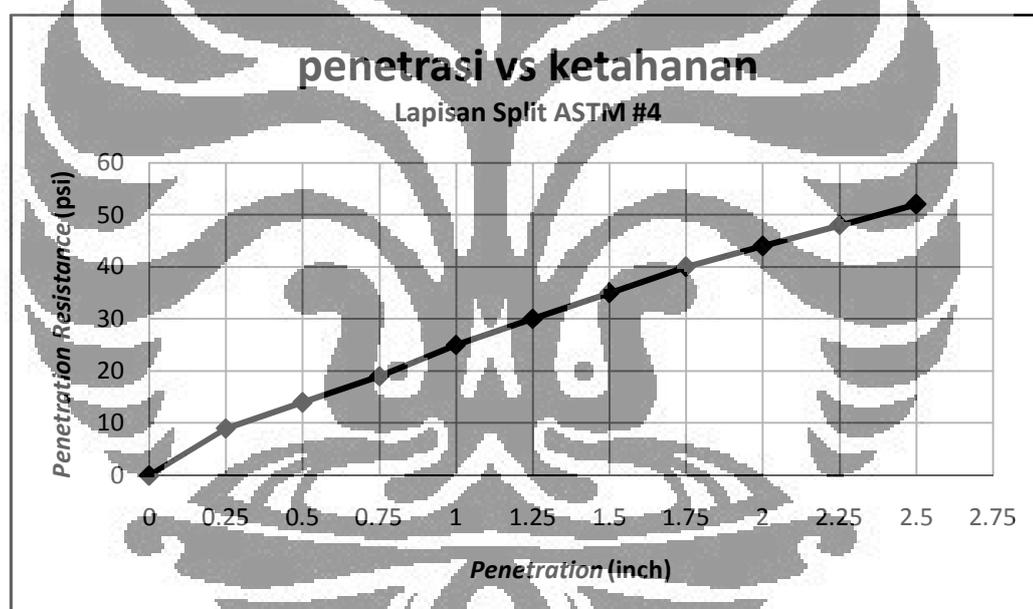
Penetration (inch)	CBR (%)	
	unsoaked	soaked
0,1	22,24	20,77
0,2	20,66	19,37

Nilai CBR lapisan pasir yang didapatkan melalui pengujian di lapangan dengan yang dilakukan di laboratorium tidak terlalu berbeda. Hal ini dimungkinkan karena nilai kadar air yang sama dan proses pemadatan yang dilakukan berarti telah sesuai dengan yang seharusnya. Dapat disimpulkan, proses pemadatan yang dilakukan dengan *stamper* sangat bagus dan sesuai dengan nilai CBR maksimum dari lapisan pasir dengan kadar air optimum yang diuji di laboratorium.

Tabel 4.9. Persentase nilai CBR Lapisan split dengan ukuran ASTM #4

Penetration (inch)	CBR (%)
1	8,666667
2	10,16889

Pada lapisan selanjutnya, pengujian nilai CBR yang dilakukan adalah untuk lapisan split dengan ukuran ASTM #4 ini. Nilai CBR yang didapatkan agak mengecewakan, hanya sebesar 10,2%. Pemadatan telah dilakukan melebihi yang seharusnya, namun ukuran butir material yang seragam dan besar menyebabkan sulitnya terjadi pemadatan untuk lapisan ini. Karena ukuran yang besar dan seragam menyebabkan tidak ada ikatan antar butiran sehingga pemadatan tidak akan pernah sempurna untuk lapisan ini. Sifat lapisan ini sangat lepas dan tidak ada ikatan antar butiran, sehingga nilai kekuatannya tidak bisa diandalkan.



Gambar 4.16. Grafik hubungan Penetrasi vs Ketahanan tanah untuk uji CBR lapisan split dengan ukuran ASTM #4

IV.3.2. Pengambilan Data Infiltrasi

Pada bagian ini akan dijelaskan bagaimana pengambilan data infiltrasi. Data infiltrasi yang diambil berdasarkan 2 cara yaitu menggunakan hujan alami dan hujan buatan. Saat ini baru digunakan cara dengan menggunakan hujan buatan. Adapun data yang diambil adalah data curah hujan dan data infiltrasi. Berikut adalah detail pengambilan data yang telah dilakukan.

IV.3.2.1. Pengambilan Data 1

Pengambilan data pertama yang dilakukan menggunakan metode hujan simulasi. Data yang tercatat adalah debit air yang mengalir ke keran, dicatat setiap 5 menitan. Untuk pengambilan data ini dibutuhkan minimal 3 orang yang masing-masing bekerja untuk mencatat debit air yang mengalir, menampung air yang keluar melalui paralon di bagian bawah model yang merupakan data infiltrasi serta satu orang lagi mengukur air yang keluar tersebut.

Namun akibat kekurangan personil, pengambilan data hanya dilakukan oleh 2 orang. Pembagian tugasnya adalah 1 orang mencatat setiap data dan 1 orang lagi menampung dan mengukur data infiltrasi. Pengukuran dan pengambilan data tidak berjalan sebagaimana mestinya. Karena kekurangan personil dan keterbatasan ruang gerak di tempat penampungan untuk data infiltrasi menyebabkan data yang diambil tidak akurat.

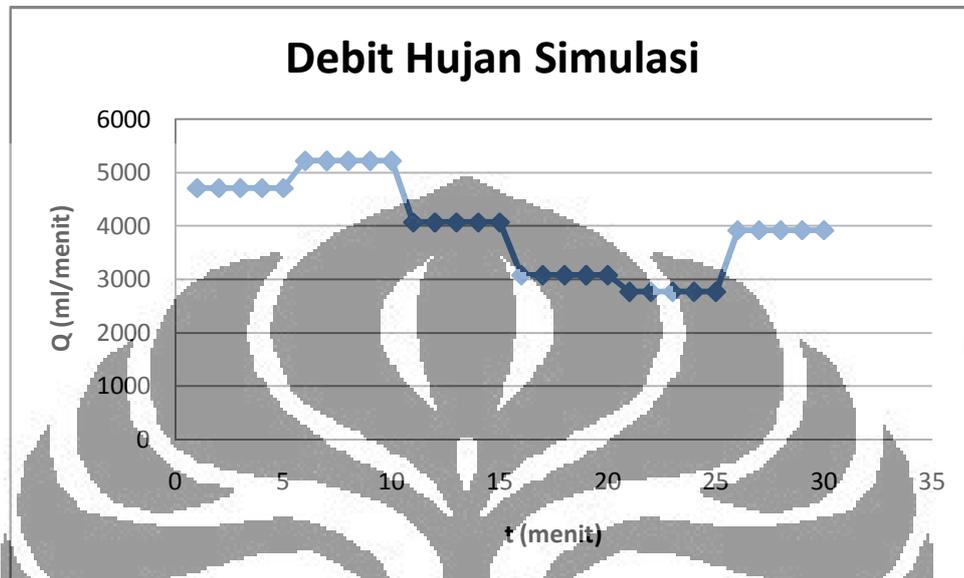
Kekurangan personil menyebabkan banyak terjadi kekurangan dalam pencatatan data. Ruang gerak yang sempit menyebabkan kerepotan dalam pengukuran infiltrasi yang terjadi. Selain itu data yang diambil setiap 5 menit menyebabkan infiltrasi yang besar. Pada tabel data terlihat, dalam 5 menit infiltrasi yang terjadi mencapai lebih dari 10 liter, hal ini sangat menyulitkan dalam membuang air yang tertampung. Berikut adalah data infiltrasi yang didapatkan pada pengukuran pertama.

Tabel 4.10. Data Infiltrasi 1

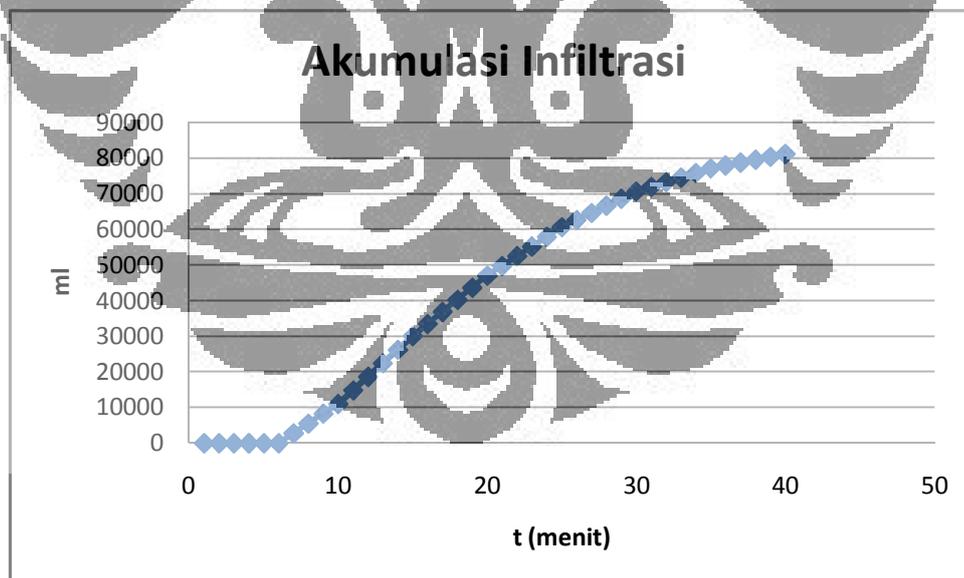
T (menit)	meteran (m ³)	Volume hujan (liter)	Debit hujan (liter/menit)	infiltrasi (liter)
0	1.52695			0
5	1.5505	23.55	4.71	0
10	1.5766	26.1	5.22	11
15	1.59695	20.35	4.07	19
20	1.61235	15.4	3.08	17
25	1.6262	13.85	2.77	13.6
30	1.6458	19.6	3.92	10
35				6.5
40				4

Dari data yang didapat, bisa dibuat grafik debit hujan simulasi berdasarkan waktu. Terlihat bahwa air yang mengalir melalui keran mengalami fluktuasi. Fluktuasi yang terjadi berada antar 2000 sampai 6000 ml/detik. Karena debit yang sangat besar, maka setelah 30 menit hujan buatan dihentikan. Intensitas hujan yang besar menyebabkan infiltrasi yang

terjadi juga besar. Lubang tempat pengukuran yang sangat sempit dan minim ruang gerak menyebabkan sulit untuk mengukur infiltrasi dalam keadaan seperti itu. Sampai menit ke 40 barulah infiltrasi berhenti total. Dapat dilihat pada Gambar 4.16 bahwa pada menit 40 masih terjadi infiltrasi.



Gambar 4.17. Debit Hujan Simulasi Pengambilan data pertama



Gambar 4.18. Akumulasi Infiltrasi Pengambilan data pertama

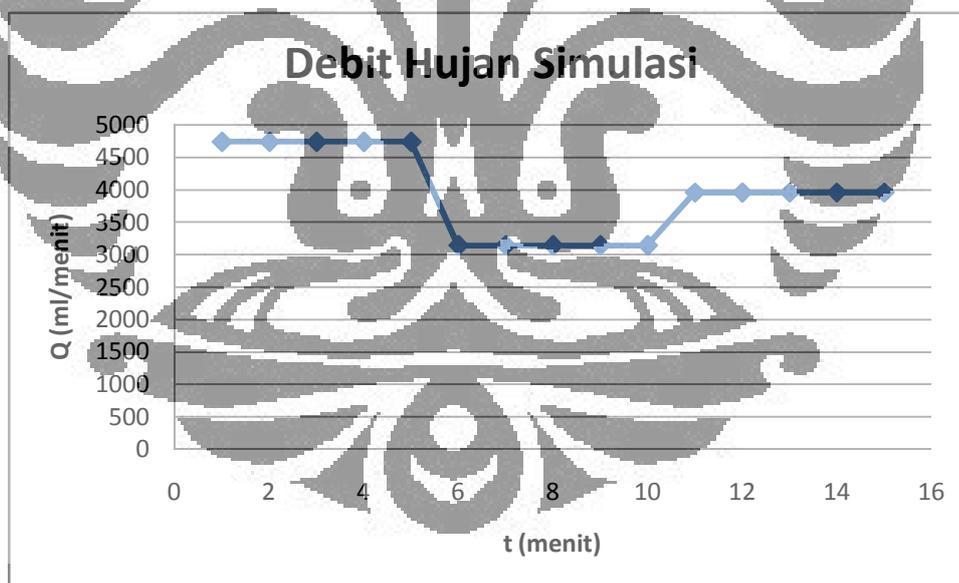
IV.3.2.2. Pengambilan Data 2

Untuk yang kedua kalinya pengambilan data masih menggunakan hujan simulasi. Sama seperti pengambilan data sebelumnya, pengambilan data ini melibatkan 2 orang. Pembagian tugas masih sama dan masalah yang dihadapi masih sama.

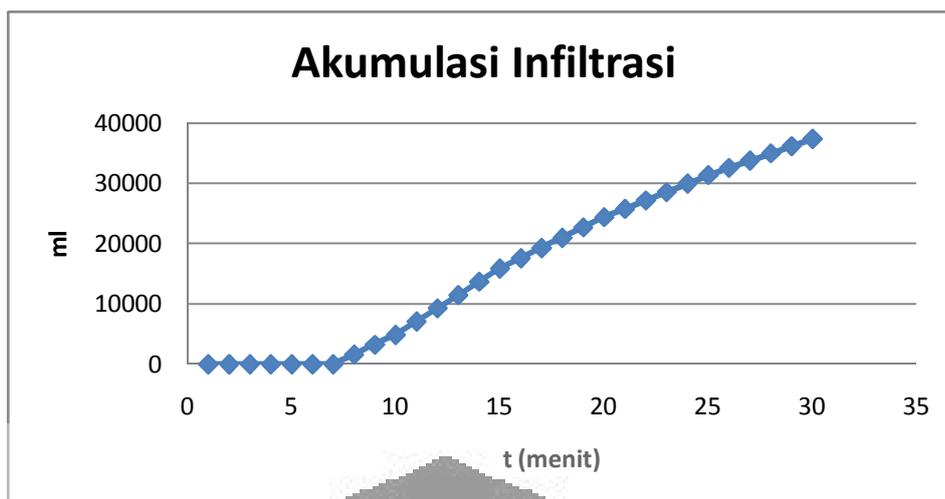
Adapun data yang didapatkan dapat dilihat pada tabel berikut:

Tabel 4.11. Data Hujan dan Infiltrasi 2

T (menit)	meteran (m3)	Volume hujan (liter)	Debit hujan (liter/menit)	infiltrasi (liter)	
0	1,65005				
5	1,67375	0,02370	23,7	4,74	
10	1,68946	0,01571	15,71	3,142	6,5
15	1,70925	0,01979	19,79	3,958	11
20			0	0	8,5
25		0	0	0	7
30		0	0	0	6
35					



Gambar 4.19. Debit Hujan Simulasi pengambilan data kedua



Gambar 4.20. Akumulasi Infiltrasi Pengambilan data Kedua

IV.3.2.3. Analisa Pengambilan data

Dalam pengambilan data infiltrasi, sebaiknya dilakukan pengambilan data setiap menitnya. Pada penelitian ini, pengambilan data dilakukan setiap 5 menit. Hal ini mengakibatkan data yang didapatkan tidak akurat dan tidak memperlihatkan apapun. Hasil pengolahan data pun tidak dapat disimpulkan apa-apa.

IV.3.3. Data CBR Lapangan Setelah Infiltrasi

Setelah dilakukan pengambilan data infiltrasi, yang tidak berjalan dengan sebagaimana mestinya karena terjadi kebocoran dari lapisan kapur. Lapisan kapur yang diharapkan dapat menyerap air dan menjadi lapisan kedap air pengganti geotekstile *impermeable* yang tidak dipakai pada penelitian ini tidak menjadi kedap air sepenuhnya, sehingga pengambilan data infiltrasi dianggap tidak valid. Tahapan selanjutnya adalah pengambilan data CBR setelah infiltrasi.

Karena jarak pengambilan data CBR pertama sebelum infiltrasi dan setelah infiltrasi yang lumayan jauh, maka angkur dicabut untuk menghindari berkaratnya angkur apabila dipendam dalam tanah untuk waktu yang lama. Oleh sebab itu pada pengambilan data CBR setelah infiltrasi ini pertama kali dilakukan pemasangan angkur pada kedua sisi benda uji. Pemasangan angkur dapat terlaksana dengan baik. Dikarenakan ketinggian benda uji yang hampir sama dengan tanah dasar disekitarnya, maka tidak terjadi masalah yang berarti dalam pemasangan angkur.



Gambar 4.21. Pemasangan Angkur dan Setelah ankur terpasang dengan baik dikedua sisi benda uji

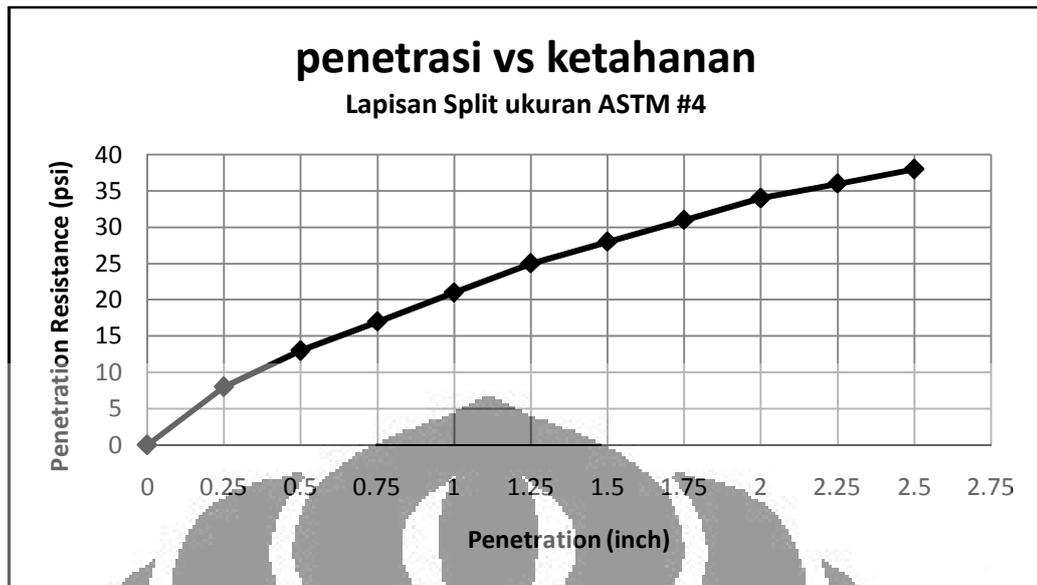
Setelah ankur terpasang dikedua sisi benda uji, selanjutnya dilakukan pembongkaran lapisan paling atas pada bagian yang akan dilakukan pengujian CBR. Lapisan *pervious concrete* diangkat dengan hati-hati agar tidak mengganggu lapisan split dengan ukuran ASTM #4 yang berada tepat dibawahnya. Setelah itu dipasang alat CBR dan dilakukan pengukuran nilai CBR dari lapisan split dengan ukuran ASTM #4. Nilai CBR yang didapatkan sangat kecil. Nilai maksimum CBR maksimum yang didapatkan hanya 7,8 %. Hal ini disebabkan oleh tidak adanya ikatan antar partikel agregat ASTM #4 ini sehingga nilai kekuatan tanahnya sangat kecil. Selain itu pada saat dilakukan pengukuran CBR, agregat yang mendapatkan tekanan ada yang pecah sehingga hasil pengukuran jadi tidak konsisten. Seperti dapat dilihat pada grafik penetrasi dibawah ini.

Tabel 4.12. Split ASTM #4

Peneiration (inch)	CBR (%)
1	6.586667
2	7.857778



Gambar 4.22. Pembongkaran lapisan pervious concrete

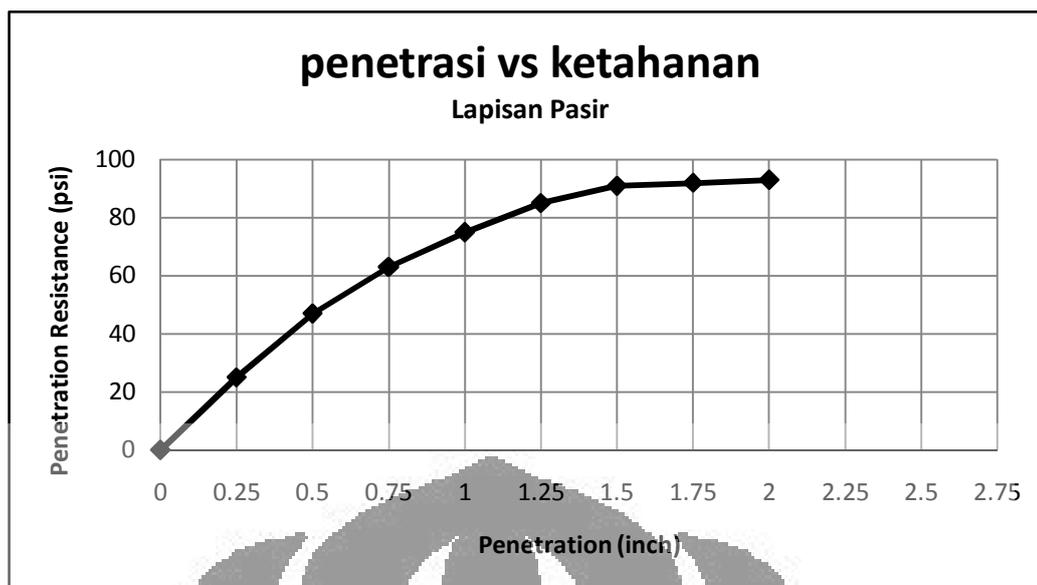


Gambar 4.23. Grafik Hubungan penetrasi dengan ketahanan tanah untuk uji CBR split ukuran ASTM #4



Gambar 4.24. Pemasangan angkur dan besi kanal untuk pengukuran CBR

Setelah dilakukan pengambilan data CBR untuk lapisan split maka tahapan selanjutnya adalah menguji CBR untuk lapisan pasir. Lapisan pasir dan lapisan split terpisahkan oleh lapisan geotekstil non woven. Pada saat pemisahan, lapisan split diangkat secara perlahan supaya tidak mengganggu lapisan pasir dan setelah itu barulah dilakukan pengguntingan lapisan geotekstil non woven. Tahap selanjutnya dilakukan pemasangan alat untuk menguji CBR lapisan pasir. Secara fisik lapisan pasir yang memiliki kadar air yang tinggi juga memiliki kadar CBR yang tinggi, nilai kadarnya dapat dilihat dari hasil uji CBR yang meningkat dibandingkan dengan nilai CBR sebelum terjadi infiltrasi.



Gambar 4.25. Grafik hubungan penetrasi dengan ketahanan tanah untuk uji CBR lapisan pasir

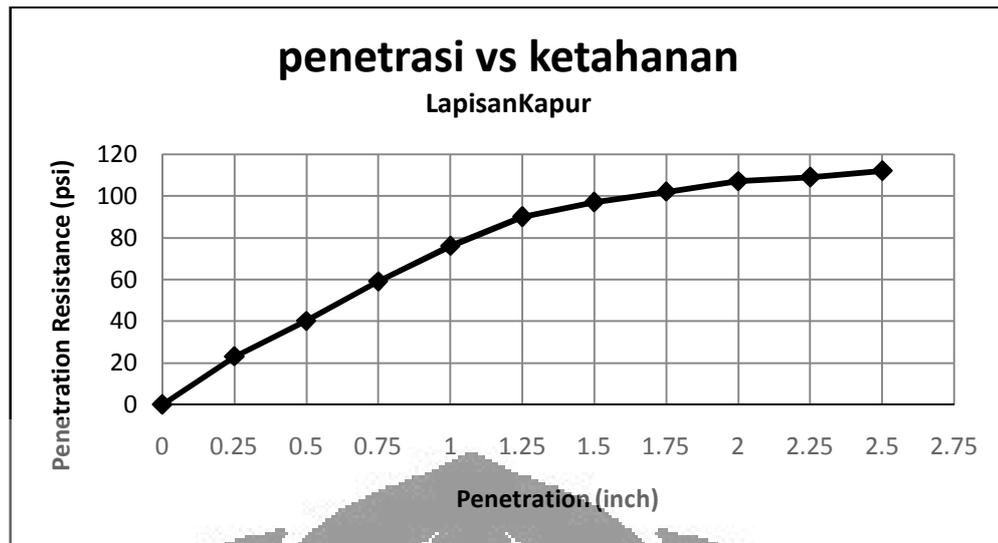
Tabel 4.13. Nilai CBR lapisan Pasir

Penetration (inch)	CBR (%)
1	26
2	21.4933

Proses selanjutnya adalah penghitungan nilai CBR pada lapisan kapur yang terdapat dibawah lapisan pasir. Lapisan pasir diangkat secara hati-hati sampai lapisan kapur terlihat, kemudian dipasang kembali alat untuk mengukur CBR pada lapisan kapur. Setelah diukur, terjadi peningkatan nilai CBR pada lapisan kapur. Hal tersebut dimungkinkan terjadi karena sifat dari kapur yang dapat menyerap air dan pada kadar air tertentu bersifat semakin *impermeable*, bisa mengeras dan terlihat seperti semen. Pada saat perancangan sifat *impermeable* inilah yang diharapkan terjadi, karena dengan sifat tersebut kapur dapat menggantikan fungsi lapisan geotekstil *impermeable*. Namun pada kenyataannya kadar kedap air dari lapisan kapur tidak bisa digunakan untuk menggantikan fungsi geotekstil *impermeable* yang menahan aliran air ke tanah dasar.

Tabel 4.14. Nilai CBR lapisan Kapur

Penetration (inch)	CBR (%)
0.1	26.34667
0.2	24.72889

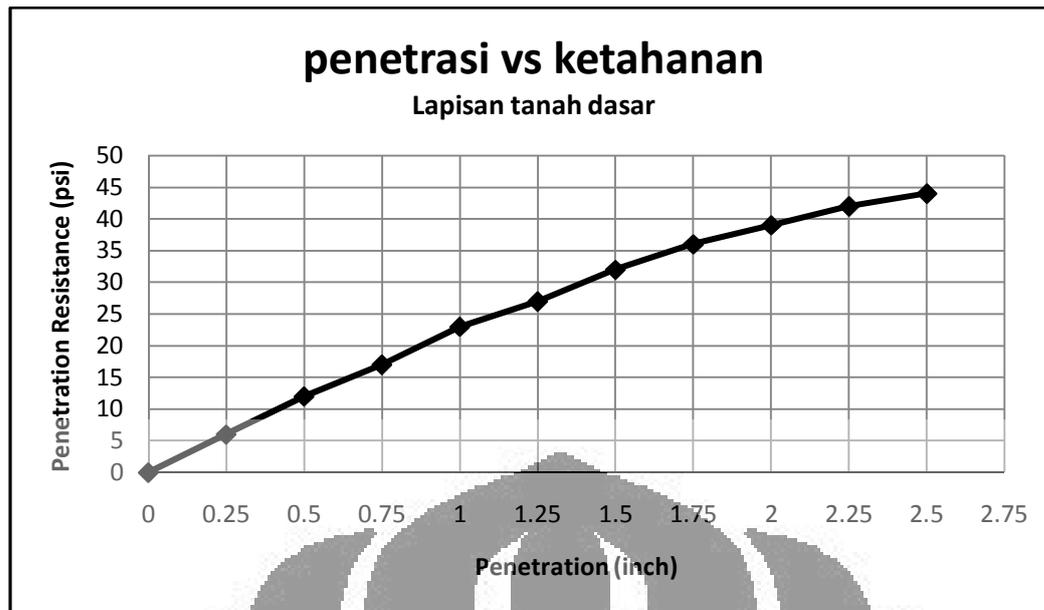


Gambar 4.26. Grafik hubungan penetrasi dengan ketahanan tanah untuk uji CBR lapisan kapur

Tahap terakhir adalah mengujian nilai CBR lapisan tanah dasar. Lapisan kapur dibuka secara perlahan sampai ketemu dengan tanah dasar. Setelah itu dilakukan pengujian CBR untuk tanah dasar. Jika dibandingkan dengan nilai CBR tanah dasar sebelum dilakukan infiltrasi, terjadi peningkatan nilai CBR. Peningkatan yang terjadi tidak begitu signifikan, namun membuktikan bahwa stabilisasi tanah dasar yang dilakukan dengan *limestone* atau batu kapur berhasil dan dapat meningkatkan nilai CBR dari tanah dasar.

Tabel 4.15. Nilai CBR Tanah Dasar

Penetration (inch)	CBR (%)
1	7.973333
2	9.013333



Gambar 4.27. Penetrasi Lapisan Tanah Dasar

IV.4. PENILAIAN TERHADAP PENERAPAN ALAT

IV.4.1. Stabilisasi Tanah Dasar

Pada saat melakukan proses stabilisasi tanah dasar, terjadi kesalahan fatal yang seharusnya tidak perlu dilakukan. Proses stabilisasi yang dilakukan tidak sesuai dengan prosedur stabilisasi. Untuk proses stabilisasi yang benar adalah sebagai berikut:

- 1) Mengaduk dan memecah tanah;

Tanah digali sampai kedalaman tertentu yang diharapkan, kemudian tanah tersebut diaduk dan dipecah sampai gembur. Jika yang digunakan bukanlah tanah dari tempat tersebut, maka tanah tersebut dikeluarkan dan dimasukkan tanah yang akan distabilisasi.

- 2) Pencampuran kapur dengan tanah;

Pencampuran kapur dengan tanah dapat dilakukan dalam keadaan kering atau basah. Kapur harus diaduk merata dengan tanah agar hasil yang didapatkan baik.

- 3) *Initial Curing*;

Setelah campuran homogen, lalu campuran yang ada dibiarkan beberapa waktu antara 24 ó 48 jam. Proses ini tidak diperlukan untuk tanah yang non-plastic.

- 4) *Final Mixing*;

Setelah curing dirasa cukup, maka tanah diaduk lagi sampai semua gumpalan pecah. Dapat ditambahkan air lagi jika dirasa perlu.

5) Pematatan

Tanah yang telah dicampur dengan kapur ini kemudian diratakan dan dipadatkan. Untuk mencapai kepadatan yang baik, konstruksi dapat dibuat berlapis-lapis.

6) *Final Curing*

Setelah pematatan, maka *lime-soil mixture* baru mengalami proses pengerasan. Dalam waktu ini diperlukan udara panas, namun penguapan air dari dalam harus dicegah. Ini dapat dicegah dengan menutup permukaan dengan karung goni yang dibasahi dengan air. *Curing* ini dilakukan selama 5-7 hari, terkadang bisa melebihi itu jika dirasa udara tidak cukup panas.

7) Pemasangan *Wearing Surface*

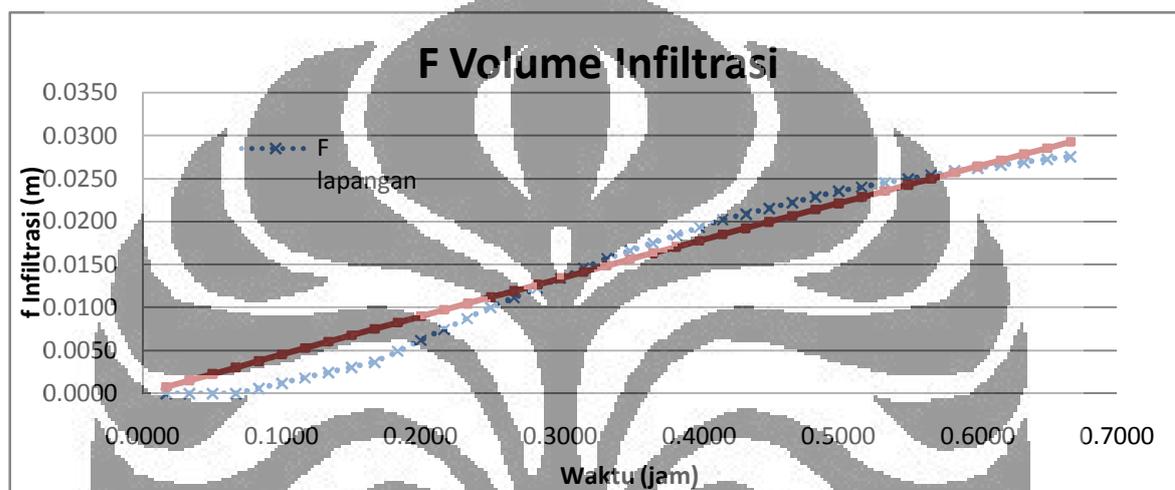
Ini dilakukan apabila lapisan ini ingin dipakai langsung untuk lalu lintas karena lapisan ini tidak tahan terhadap abrasi. Permukaannya harus ditutup oleh lapisan *wearing surface*. *Wearing surface* hanya boleh diletakkan setelah lapisan stabilisasi telah benar-benar keras.

Pada pengerjaan skripsi ini, tidak dilakukan sesuai prosedur yang ada. Sehingga lapisan stabilisasi tidak berfungsi sesuai dengan yang diharapkan. Untuk penelitian selanjutnya apabila masih ingin menggunakan kapur sebagai pengganti lapisan geotekstil impermeable sebaiknya melakukan penelitian lebih lanjut terlebih dahulu mengenai komposisi dari kapur dan tanah, proses pengerjaan dan efektifitas dari lapisan ini untuk menghambat laju air meresap ke dalam tanah untuk mempertahankan nilai CBR tanah dasar.

Untuk kemungkinan yang lain yang dapat digunakan untuk pengganti lapisan geotekstil impermeable yang mungkin dilakukan adalah melakukan stabilisasi tanah dengan semen. Proses ini mungkin dapat dilakukan dengan menambahkan *admixture* agar terbuat lapisan impermeable, namun harus dilakukan analisa secara ekonomi apakah proses ini lebih murah dibandingkan dengan menggunakan lapisan geotekstil. Pemilihan bahan yang paling efisien sangat dibutuhkan untuk pengembangan penelitian ini.

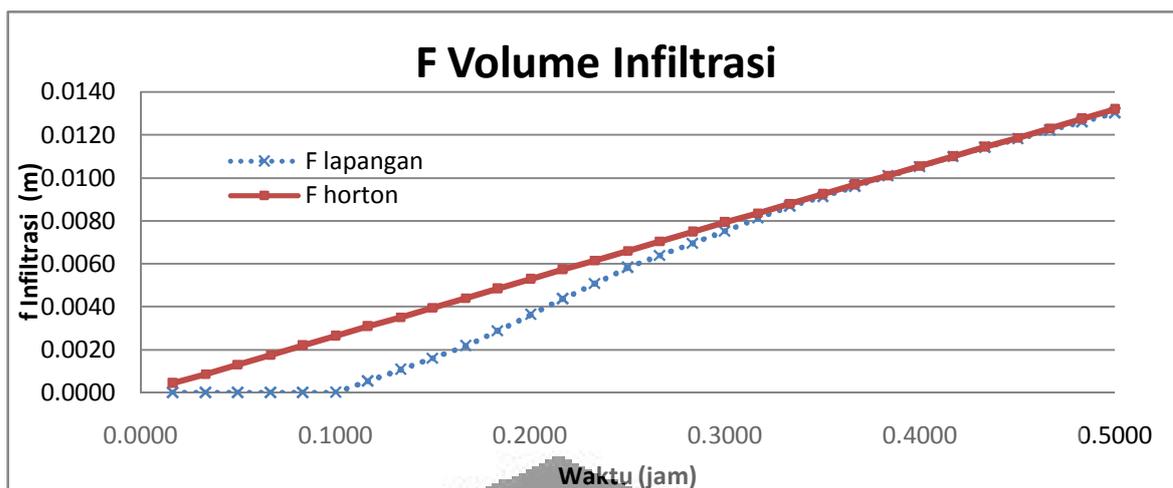
IV.4.2. Pengukuran Kapasitas Infiltrasi

Dari data yang didapatkan sebelumnya, dilakukan pengolahan data horton. Dari hasil pengolahan data, didapatkan bahwa nilai horton persamaan pertama yang didapatkan adalah $F = 0,035t + \frac{(0,045 - 0,035)}{0,4755}(1 - e^{-0,4755t})$ dengan error sebesar 0,049 berarti data ini memiliki 5% error. Persamaan horton diatas menunjukkan bahwa nilai laju infiltrasi awal (f_0) sebesar 0,045 m/jam, nilai laju infiltrasi pada saat konstan adalah 0,035 m/jam dan nilai konstan infiltrasi sebesar 0,4755/jam.



Gambar 4.28. Grafik horton pada pengambilan data pertama

Persamaan kedua yang didapatkan adalah $F = 0,025t + \frac{(0,0265 - 0,025)}{0,4}(1 - e^{-0,4t})$ dengan error sebesar 0,006 berarti data ini memiliki 0,6% error. Persamaan horton diatas menunjukkan bahwa nilai laju infiltrasi awal (f_0) sebesar 0,0265 m/jam, nilai laju infiltrasi pada saat konstan adalah 0,025 m/jam dan nilai konstan infiltrasi sebesar 0,4/jam. Kedua persamaan yang didapatkan pada perhitungan data ini belum menampilkan kondisi laju infiltrasi horton yang sebenarnya.



Gambar 4.29. Grafik Horton pada pengambilan data kedua

Dalam pengambilan data infiltrasi yang telah dilakukan, nilai f_c , f_0 dan k yang didapatkan terus mengalami penurunan. Nilai infiltrasi horton yang didapatkan terus mengalami perubahan dari waktu ke waktu. Hal ini mungkin dikarenakan kondisi tanah yang terus mengalami perubahan. Pada saat pertama kali dilakukan pengukuran infiltrasi kondisi benda uji masih belum jenuh sama sekali. Setelah beberapa kali dilakukan, dengan rentang waktu yang lumayan lama, namun benda uji ditutup dengan menggunakan seng, jadi kondisi benda uji dari awal sampai pengukuran terakhir tidak mengalami penguapan. Kondisi infiltrasi ketiga tidak dapat mewakili nilai infiltrasi horton dari benda uji, karena nilai f_0 , f_c dan K jauh dibawah hasil pengujian sebelumnya.

Pada pengujian keempat, terjadi hal yang sangat mengejutkan penguji. Pada tempat pengambilan sampel terjadi genangan air. Hal ini sangat mengejutkan penguji. Setelah terjadi genangan, pengujian dihentikan. Menurut analisa penguji, hal ini disebabkan oleh tidak adanya penahan air di bagian bawah. Daya kapilaritas dari tanah menyebabkan air yang berada pada benda uji yang telah dalam keadaan jenuh menggenang di permukaan tempat pengambilan sampel. Penggenangan ini lebih dikarenakan tidak adanya lapisan *impermeable* dibagian bawah yang pada penelitian ini diganti dengan stabilisasi tanah dasar dengan menggunakan kapur sebagai pengganti lapisan *impermeable*. Pada kenyataannya penggantian ini membuat tidak akuratnya data yang didapatkan.

Kesalahan yang terjadi pada saat melakukan stabilisasi merupakan faktor utama terjadinya kebocoran ini. Tidak menyatunya tanah dengan kapur, dan masih banyaknya kapur yang masih berbentuk batuan dengan ukuran bituran yang relatif besar sehingga dapat meloloskan air ke lapisan dibawahnya.



Gambar 4.30. Posisi pengambilan data infiltrasi

Seperti dapat dilihat pada gambar diatas, posisi pengambilan data infiltrasi, dimana terjadi genangan dibawahnya.



Gambar 4.31. Posisi tempat keluarnya air dari hujan simulasi

IV.4.3. CBR Tanah Dasar

Nilai CBR yang telah diukur sebelum dan setelah infiltrasi pada setiap lapisan tanah mengalami perubahan. Berikut adalah nilai CBR dari masing-masing lapisan. Pengambilan data yang dilakukan hanya satu kali setiap lapisan dan satu kali pada sebelum dan setelah infiltrasi. Data yang didapatkan memperlihatkan nilai CBR dari setiap lapisan tanah yang diukur.

Tabel 4.16. Tabel rekapitulasi nilai CBR

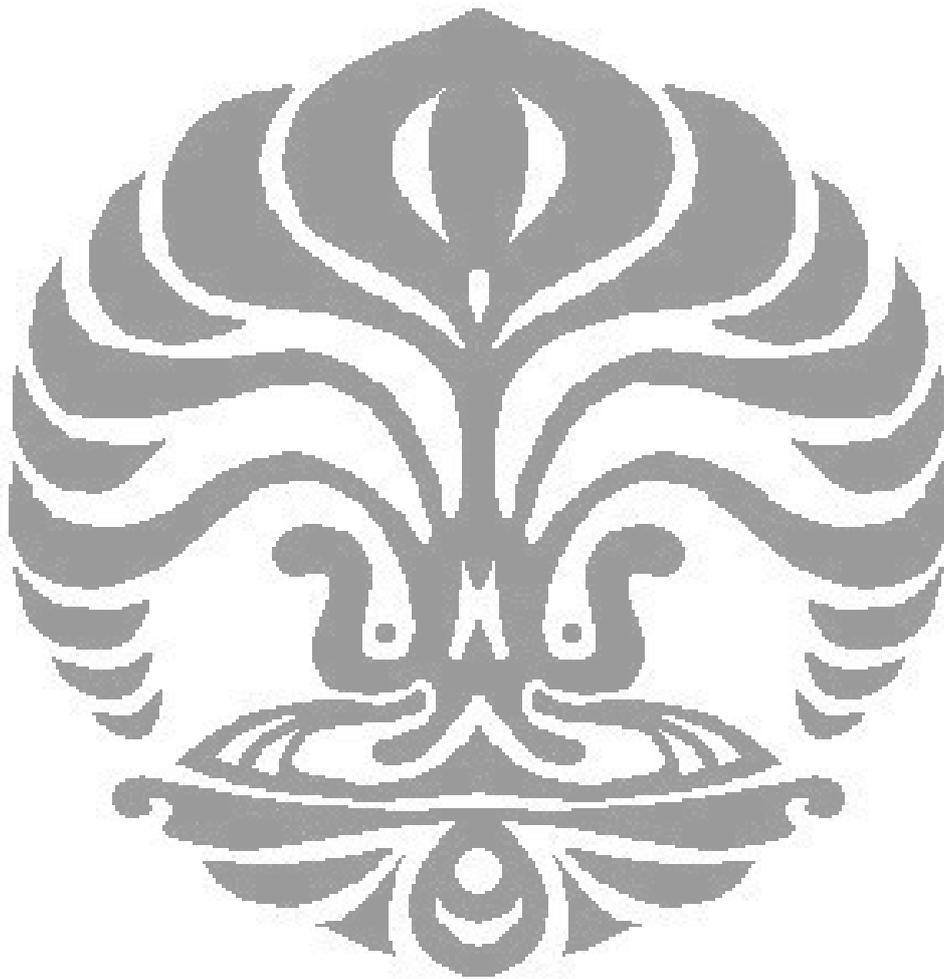
Tanah Dasar	Sebelum Infiltrasi		Setelah Infiltrasi	
	<i>Penetration</i> (inch)	CBR (%)	<i>Penetration</i> (inch)	CBR (%)
	0,1	5,02	0,1	7,97
0,2	4,24	0,2	9,01	
Lapisan Kapur	Sebelum Infiltrasi		Setelah Infiltrasi	
	<i>Penetration</i> (inch)	CBR (%)	<i>Penetration</i> (inch)	CBR (%)
	0,1	15,6	0,1	26,35
0,2	18,5	0,2	24,73	
Lapisan Pasir	Sebelum Infiltrasi		Setelah Infiltrasi	
	<i>Penetration</i> (inch)	CBR (%)	<i>Penetration</i> (inch)	CBR (%)
	0,1	20,8	0,1	26,0
0,2	24,27	0,2	21,49	
Lapisan split dengan ukuran ASTM #4	Sebelum Infiltrasi		Setelah Infiltrasi	
	<i>Penetration</i> (inch)	CBR (%)	<i>Penetration</i> (inch)	CBR (%)
	0,1	8,67	0,1	6,59
0,2	10,17	0,2	7,86	

Dari tabel diatas dapat dilihat bahwa nilai CBR sebelum dan setelah infiltrasi mengalami kenaikan, namun pada lapisan split dengan ukuran ASTM #4 justru mengalami penurunan. Pada dasarnya nilai CBR pada tanah dengan kadar air yang tinggi seharusnya mengalami penurunan, namun pada setiap lapisan ini nilai CBR justru mengalami kenaikan. Kenaikan ini bisa diakibatkan oleh kadar air pada setiap lapisan yang optimum. Karena pada penelitian ini tidak mengukur kadar air sebelum dan sesudah infiltrasi, maka tidak bisa dianalisa apakah kenaikan ini terjadi karena optimumnya kadar air pada setiap lapisan atau adanya faktor lain.

Apabila dilihat secara fisik, lapisan yang mengalami kenaikan nilai CBR setelah infiltrasi dibandingkan sebelum infiltrasi terlihat makin keras. Kemungkinan adalah efek dari beban dari atas pada waktu yang lama membuat pasir, kapur dan tanah dasar semakin padat. Sifat lapisan kapur yang dapat menyerap air juga berpengaruh dalam peningkatan nilai CBR ini.

Namun nilai CBR yang telah diambil dalam penelitian ini tidak dapat dijadikan patokan dan tidak dapat disimpulkan apakah kekuatan dari setiap lapisan bertambah besar ataupun mengalami penurunan. Karena hanya dilakukan 1 kali pengujian dan hanya pada 1 titik. Untuk sebuah penelitian yang menghasilkan kesimpulan seharusnya dilakukan

minimal 3 kali pengambilan data sehingga dapat dilihat standar deviasi dan rata-rata dari data tersebut. Pada penelitian ini yang Cuma 1 kali, tidak dapat diambil kesimpulan apakah mengalami kenaikan ataupun penurunan. Oleh sebab itu pada penelitian selanjutnya diharapkan pengambilan nilai CBR lapangan dilakukan di 3 titik atau lebih agar hasil yang didapatkan dapat dibandingkan dan dihasilkan sebuah kesimpulan.



BAB V

KESIMPULAN DAN SARAN

Dalam studi pengembangan alat instalasi pengukuran infiltrasi dari jalan *permeable*, berdasarkan tahap pelaksanaan dapat disimpulkan sebagai berikut:

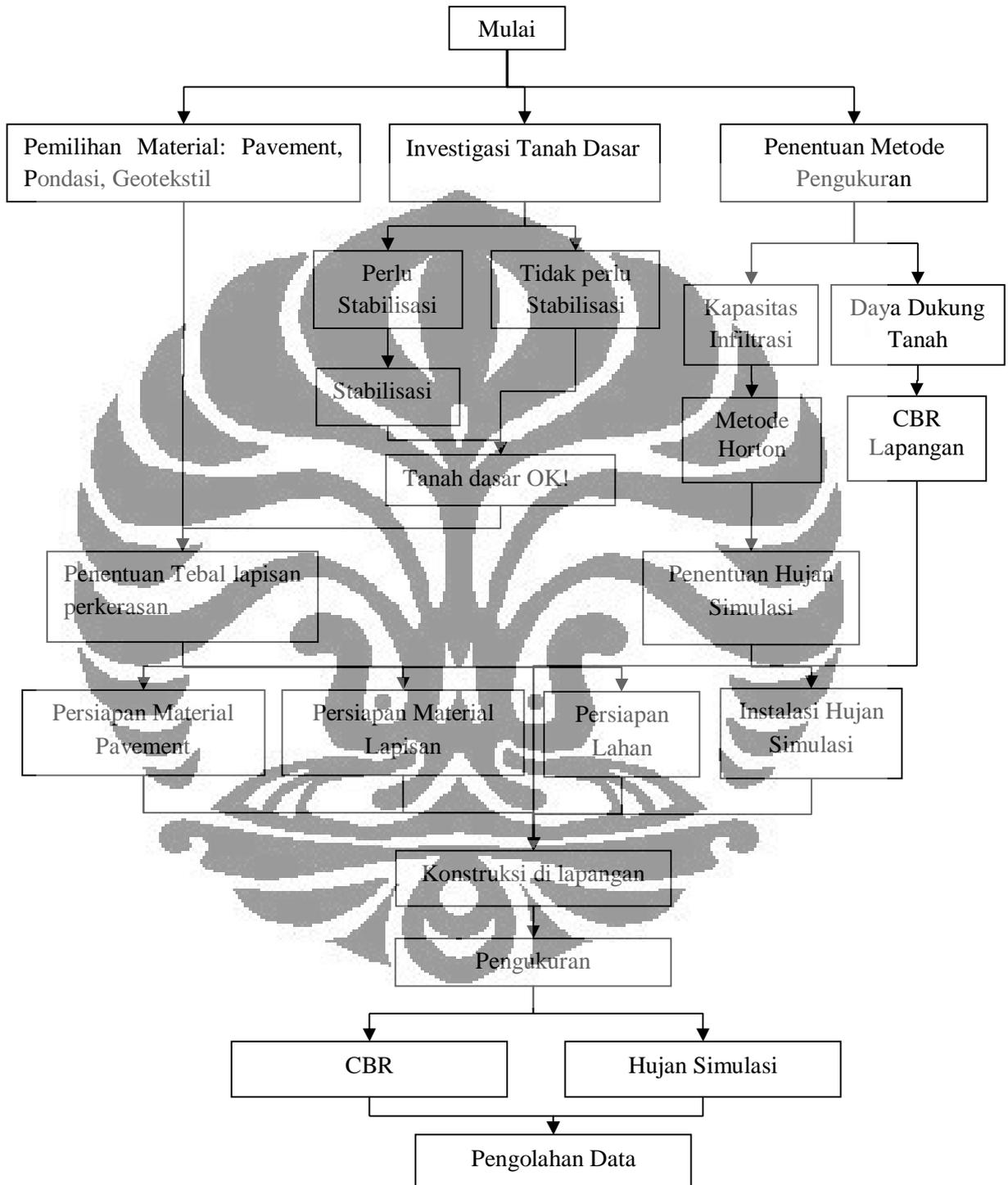
- dalam pengambilan data infiltrasi terjadi kebocoran yang tidak terprediksi pada saat perancangan yang terjadi pada sambungan dan lapisan kapur yang pada perancangannya dianggap *impermeable* ternyata masih menyerap air ke tanah, sehingga kurva horton yang dihasilkan tidak mewakili struktur jalan ini;
- hasil pengukuran CBR memperlihatkan terdapatnya kenaikan nilai CBR pada lapisan pasir, lapisan stabilisasi dan lapisan tanah dasar serta penurunan pada lapisan agregat, namun pengukuran yang hanya dilakukan 1 kali pada setiap prosesnya tidak dapat dijadikan patokan dalam mengambil kesimpulan;

Karena banyak hal yang bisa digali dari skripsi ini yang masih mencakup kedalam *permeable pavement*, maka untuk pembuatan benda uji pada penelitian berikutnya dapat mengikuti bagan prosedur perancangan pembuatan model fisik dan alat ukur infiltrasi *permeable pavement* berikut ini:

❖ Perancangan

- perlu dilakukan survei untuk mengetahui kondisi eksisting dari lokasi penelitian;
- perlu pengujian karakteristik dari tanah dasar dan material penyusun pondasi;
- perlu disusun cara pemasangan geotekstil di lapangan sesuai dengan standar yang berlaku, untuk menghindari kebocoran pada sambungan;
- perlu dipersiapkan penempatan pipa *perforated* dan instalasi simulasi hujan sesuai dengan kemiringan jalan;
- perlu dipertimbangkan kemiringan tanah dasar agar air hasil infiltrasi benar-benar mengaklir ke pipa *perforated*;
- perlu dipersiapkan jumlah pengujian dan titik pengujian CBR;
- dengan pengujian ini disimpulkan bahwa harus dipasang geotekstil *impermeable* untuk melindungi kekuatan tanah dasar dari efek infiltrasi. Penambahan lapisan stabilisasi sebagai pengganti lapisan *impermeable* tidak dianjurkan karena tidak menjamin infiltrasi air ke tanah dasar tidak terjadi;

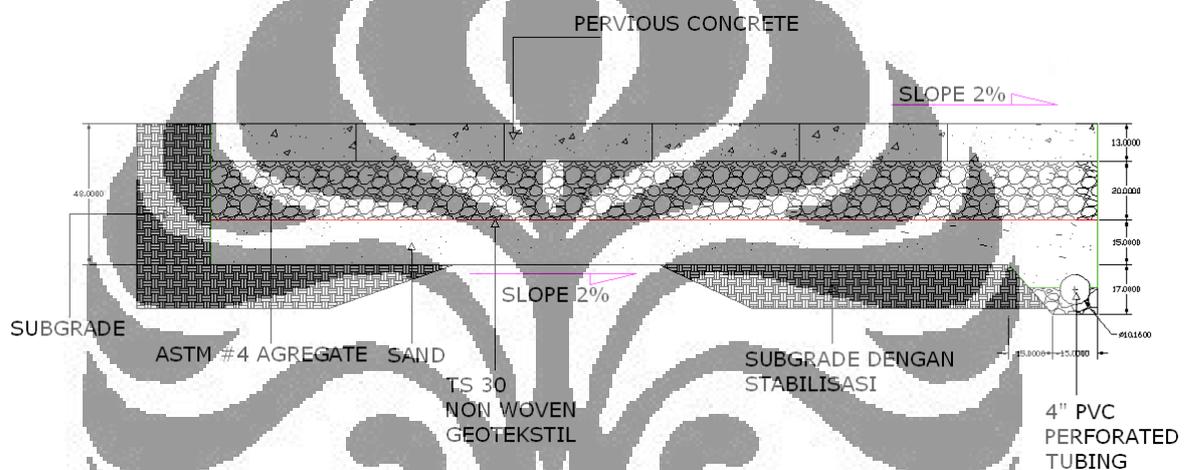
- o fungsi non-struktural dari *permeable pavement* juga harus diperhatikan yaitu sebagai penyaring air yang masuk ke tanah agar bebas dari polutan yang ada di jalan, sehingga kondisi material pasir dan material split ASTM #4 harus dipertimbangkan.



Gambar 5.1. Metode Pembuatan Alat Ukur Permeable Pavement

❖ Pelaksanaan Konstruksi

- dalam pembuatan beton berpori (*pervious concrete*) untuk lapisan perkerasan dilakukan di laboratorium, untuk hasil yang lebih baik sebaiknya sampel *pervious concrete* dilakukan uji kuat tekan, kuat lentur dan permeabilitas;
- pemadatan tanah dasar dilakukan dengan menggunakan stamper sampai dicapai nilai CBR minimal 7% yang merata pada area, ditunjukkan dengan hasil tes CBR lapangan minimal 3 titik pengujian
- penempatan pipa perforated sesuai dengan gambar dibawah ini dengan memastikan kemiringan tanah dasar agar air dapat mengalir ke pipa

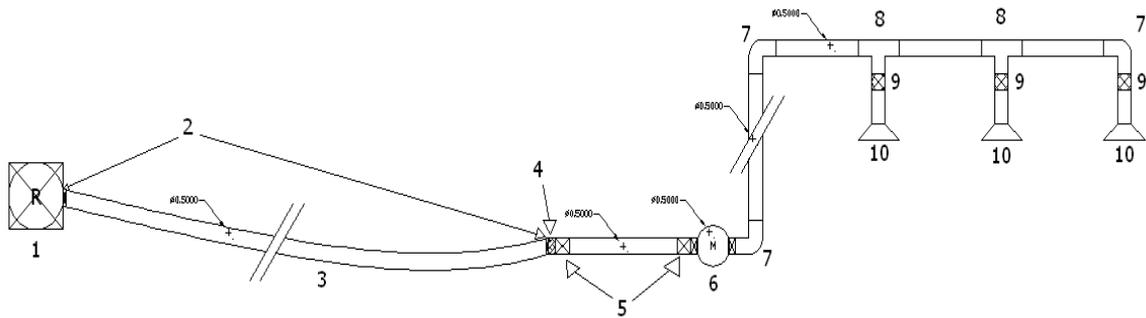


Gambar 5.2. Posisi Pipa pada konstruksi

- spesifikasi pasir dan agregat harus sesuai dengan yang telah ditetapkan dan tidak mengandung lumpur;
- pemakaian geotekstil *non-woven* sebagai separator dipasang diantara lapisan *base* dengan *sub-base*, antara lapisan *base* dengan perkerasan juga diberikan geotekstil *non-woven* agar tidak tercampur;
- untuk menjaga posisi lapisan perkerasan, sebaiknya dipasang lapisan pasir setebal kira-kira 5 cm diatas lapisan *base* dengan partisi menggunakan geotekstil *non-woven*.

❖ Pengoperasian Alat Ukur

- sumber air dari kran di belakang PAF cukup memadai untuk dijadikan sumber dari instalasi simulator hujan namun harus dipertimbangkan waktu pemakaian karena debit yang tidak stabil pada saat jam kerja;
- gambar instalasi dapat dilihat pada bagan berikut:



Gambar 5.3. Bagan instalasi simulator hujan

- tim minimum untuk pengoperasian alat sejumlah 3 orang;
- ❖ Pengolahan Data
 - alat ukur ini dapat mengukur kapasitas infiltrasi dengan menggunakan metode horton;
 - pada penggantian *geotekstile impermeable* dengan proses stabilisasi tanah dasar menggunakan kapur tidak didapatkan hasil yang maksimal karena kesalahan proses.

DAFTAR PUSTAKA

- Adidarma, Ir. Wanny Dipl. H. dan Ir. Joyce Marths W. *Mengenal Dasar-dasar Hidrologi*. Penerbit NOVA. Bandung.
- BMP Design Urban Drainage and Flood Control District, 2004.*
- Departemen Pekerjaan Umum, SKBI.2.3.26.1987, UDC. 625.73 (02), SNI 1732-1989-F. *Petunjuk Perencanaan Tebal Perkerasan Lentur Jalan Raya dengan Metode Analisa Komponen*. Yayasan Badan Penerbitan P.U. Jakarta. 1987.
- Departemen Pekerjaan Umum Biro Teknik. *Lime-soil Stabilization*. Jakarta. 1968.
- Departemen Pekerjaan Umum Direktorat Jendral Bina Marga, No. 01/ST/BM/1972. *Peraturan Pelaksanaan Pembangunan Jalan Raya*. Jakarta. 1972.
- Departemen Pekerjaan Umum. *Pedoman Perencanaan Jalan Kaku*. Jakarta.
- Indah Purnama Sari, Dian. (2007). *Pengukuran Kapasitas Infiltrasi dan Daya Dukung Permeable pavement Untuk Jalan Lingkungan Dengan Menggunakan Material Lokal*. Skripsi. Depok. Departemen Teknik Sipil Fakultas Teknik, Universitas Indonesia
- Hendarsin, Shirley L. *Perencanaan Teknis Jalan Raya*. Politeknik Negeri Bandung Jurusan Teknik Sipil. Bandung. 2000.
- Immanuel, Roy. (2008). *Perilaku Kuat Tekan dan Kuat Lentur Pada Pervious Concrete*. *Knox County Tennessee Stormwater Management Manual, volume 2 (Technical Guidance), page 4-192*.
- Maidment, David and McGraw-hill, inc. *Handbook of Hydrology*. 1993.
- Rahmayati, Ni Made. (2007). *Rancang Campur Pembuatan Pervious Concrete*, Skripsi, Depok, Departemen Teknik Sipil Fakultas Teknik Universitas Indonesia.
- Soemarto, C.D. (1999). *Hidrologi Teknik, Edisi Kedua*, Jakarta, Erlangga.
- Sultan Haji, Tunggul. (2005)
- Wanielista, Martin, Robert Kersten, Ron Eaglin, John Wiley & sons, inc. *Hydrology : Water Quantity and Quality Control 2nd ed*. 1997.
- www.bappenas.go.id/index.php_module=Filemanager&func=download&pathext=content_Ex_press_&view=85_2banjir_final