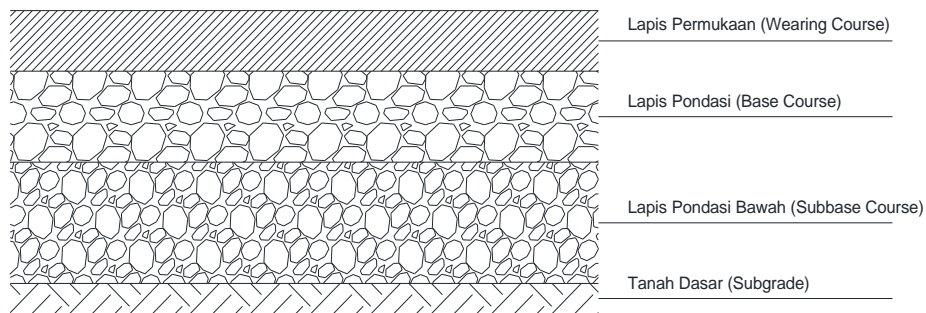


BAB II STUDI PUSTAKA

2.1. Perkerasan Lentur

Perkerasan lentur merupakan lapisan yang terdiri lapisan aspal beton (*Surface Course*), lapisan pondasi (*Base Course*), dan lapis tanah dasar (*Subgrade*) dengan aspal sebagai bahan pengikat. Secara umum jenis perkerasan ini sering digunakan di perkotaan sebagai perkerasan jalan yang menerima beban lalu lintas ringan hingga sedang.



Sumber : Sukirman, (2010)

Gambar 2.1 Struktur Perkerasan Lentur

2.1.1. Lapis Permukaan (*Surface Course*)

Lapisan permukaan merupakan lapisan yang memiliki kontak langsung dengan roda. Lapisan ini menggunakan material agregat dengan aspal sebagai bahan pengikatnya yang memiliki stabilitas tinggi, tahan air, dan memiliki daya tahan selama umur rencana. Dalam lapisan permukaan terdiri dari beberapa lapisan. Diantaranya :

1. Lapis aus (*wearing course*), merupakan lapisan yang terletak paling atas dan lapisan yang terkena kontak langsung dengan roda dan cuaca; dan
2. Lapis pengikat (*Binder course*), merupakan lapisan yang terletak diantara lapis aus dan lapis pondasi yang memiliki fungsi sebagai pemikul beban lalu lintas kemudian distribusikan pada pondasi jalan.

Menurut Sukirman (2010) beberapa jenis lapis permukaan perkerasan yang digunakan di Indonesia adalah sebagai berikut.

1. Laburan aspal, merupakan campuran yang terdiri dari campuran aspal dan agregat dengan gradasi berdasarkan jenis lapisannya. Burda atau laburan aspal dibedakan menjadi dua jenis, yaitu :
 - Laburan aspal satu lapis (Burtu); dan
 - Laburan aspal dua lapis (Burda);
2. Lapis tipis aspal pasir (Latasir), merupakan campuran yang terdiri dari aspal, agregat halus dan atau pasir yang dicampur pada suhu tertentu.
3. Lapis tipis aspal beton (Lataston), merupakan campuran aspal yang menggunakan agregat yang bergradasi senjang dengan ukuran maksimum agregat $\frac{3}{4}$ inci. Sesuai dengan fungsinya lataston dibagi kedalam dua jenis , yaitu :
 - Lataston lapis aus atau *Hot Rolled Sheet Wearing Course*; dan
 - Lataston lapis permukaan antara *Hot Rolled Sheet Base Course*;
4. Lapis beton aspal (Laston). merupakan campuran aspal dengan menggunakan agregat dengan gradasi baik. Terdapat dua jenis laston yang digunakan di Indonesia, yaitu :
 - Laston lapis aus atau *Asphalt Concrete Wearing Course*;
 - Laston lapis permukaan antara atau *Asphalt Concrete Binder Course*;
5. Lapis penetrasi macadam (Lapen), merupakan lapisan yang terdiri dari agregat pokok, agregat pengunci, dan agregat penutup (untuk lapis permukaan) dengan gradasi yang seragam.
6. Lapis Asbuton Agregat (Lasbutag), merupakan lapisan yang terdiri dari agregat halus, agregat kasar, agregat asbuton, bahan peremaja dan filler (bila diperlukan) yang dicampur, dihampar dan dipadatkan secara dingin.

2.1.2. Lapis Pondasi (*Base Course*)

Lapis pondasi terletak diantara lapis pondasi dan lapis permukaan kemudian apabila struktur perkerasan tidak menggunakan lapisan pondasi bawah maka lapis

pondasi langsung diletakan diatas tanah dasar (*subgrade*). Lapis pondasi memiliki fungsi sebagai berikut:

1. Sebagai Struktur penahan beban vertikal yang terjadi akibat beban kendaraan kemudian didistribusikan pada lapisan dibawahnya;
2. Sebagai perletakan lapis permukaan; dan
3. Sebagai lapis peresap air tanah.

Material yang digunakan sebagai lapis pondasi ini dapat berupa material yang cukup kuat dan awet sesuai perencanaan seperti batu pecah, kerikil, stabilisasi tanah, dan atau agregat dengan aspal sebagai pengikatnya.

Menurut Sukirman (2010) berbagai jenis lapis pondasi yang umum digunakan di Indonesia, diantaranya adalah sebagai berikut.

1. Laston lapis pondasi atau (*Asphalt Concrete Base*);
2. Lasbutag lapis pondasi;
3. Lapis penetrasi macadam (*Lapen*);
4. Lapis pondasi agregat;
5. Lapis pondasi tanah semen; dan
6. Lapis pondasi agregat semen.

2.1.3. Lapis Pondasi Bawah (*Subbase Course*)

Lapisan ini terletak diantara lapis pondasi dan tanah dasar (*subgrade*). Lapisan ini memiliki fungsi sebagai berikut :

1. Bagian dari struktur perkerasan yang berfungsi menyebarkan beban yang diterima dari lapisan diatasnya ke tanah dasar;
2. Lapis peresap air tanah agar tidak berkumpul di pondasi; dan
3. Kemudahan dalam pelaksanaan, ini dimaksudkan agar tanah segera dilapisi pondasi untuk menghindari perubahan kondisi tanah dasar akibat perubahan cuaca.

Terdapat beberapa material agregat yang baik digunakan sebagai lapis pondasi bawah maupun atas diantaranya Agregat kelas A, Agregat kelas B, Agregat kelas C, dan kelas S. Dimana material agregat kelas A dan B biasa digunakan sebagai lapis pondasi, Agregat kelas S biasa digunakan sebagai lapis pondasi bahu jalan tanpa penutup, dan Agregat kelas C dapat digunakan sebagai lapis pondasi bahu jalan tanpa penutup dengan LHRT < 2000 kendaraan/hari pada jalur lalu lintas.

2.1.4. Tanah Dasar (*Subgrade*)

Tanah dasar merupakan tempat dihamparkannya struktur perkerasan jalan. Mutu lapisan tanah dasar sangat menentukan ketahanan struktur perkerasan dalam menerima beban lalu lintas selama umur rencana. Oleh karena itu apabila terdapat tanah dasar bermasalah maka perlu dilakukan perbaikan dahulu seperti dicampurkan dengan kapur atau zat lainnya kemudian dilakukan pemadatan dengan kondisi kadar air optimum yang bertujuan agar mendapatkan kepadatan yang maksimal yang dimana akan berpengaruh terhadap daya tahan struktur perkerasan menerima beban lalu lintas. Apabila ditinjau dari elevasi muka tanah, lapisan tanah dasar dapat dibedakan menjadi:

1. Lapisan tanah dasar tanah asli;
2. Lapisan tanah dasar tanah timbunan; dan
3. Lapisan tanah dasar hasil galian.

2.2. Metode Perencanaan Tebal Perkerasan Lentur

Metode perhitungan yang digunakan sebagai perencanaan tebal perkerasan lentur yaitu menggunakan metode mekanistik empiris dimana dalam metode ini memerlukan *input* data beban roda, struktur perkerasan dan sifat mekanik material, dengan keluaran berupa kinerja perkerasan terhadap beban roda seperti tegangan, regangan atau lendutan. Dari hasil respon struktural tersebut digunakan sebagai kontrol dalam menentukan kinerja struktur perkerasan dalam hal deformasi permanen dan retak lelah. Standar perhitungan tebal perkerasan jalan

ini mengacu pada buku Direktorat Jenderal Bina Marga Manual Desain Perkerasan Jalan 2017.

2.2.1. Beban Lalu lintas

Pada desain tebal perkerasan jalan hal sangat penting dalam analisis perencanaan yaitu beban lalu lintas yang nantinya akan dipikul oleh stuktur perkerasan selama umur rencana. Beban lalu lintas ini dimodelkan sebagai banyaknya volume lalu lintas yang disurvei kemudian data tersebut diperhitungkan kembali banyaknya volume lalu lintas selama umur rencana. Adapun Elemen utama beban lalu lintas adalah sebagai berikut :

1. Beban sumbu dan roda kendaraan.

Beban kendaraan didistribusikan melalui bidang kontak antara ban dan muka jalan. Sebagai keperluan dalam desain tebal perkerasan bidang kontak antara roda kendaraan dan perkerasan jalan diasumsikan berbentuk lingkaran dengan radius sama dengan lebar ban. Sukirman (2010) memberikan rumus untuk menghitung besarnya beban roda seperti dirumuskan dibawah:

$$P = \pi p a^2 \dots\dots\dots (2.1)$$

Dimana :

a = radius bidang kontak

P = beban roda

p = tekanan ban

Beban roda pada kendaraan akan terjadi berulang kali selama masa pelayanan jalan tersebut. Jika terdapat sebuah kendaraan yang memiliki dua buah sumbu I-I maka perkerasan akan menerima beban sebanyak dua kali begitu juga bila kendaraan terdapat tiga sumbu maka perkerasan akan menerima beban sebanyak tiga kali dengan beban roda sebesar setengah dari beban sumbunya. Artinya jumlah repetisi beban yang diakibatkan oleh beban sama dengan jumlah sumbu kendaraanya. Maka dalam perencanaan tebal perkerasan beban lalu lintas dinyatakan dengan repetisi lintasan sumbu.

2. Volume lalu lintas.

Volume lalu lintas dalam perencanaan tebal perkerasan jalan dinyatakan dalam banyaknya jumlah kendaraan yang melintas berdasarkan lamanya waktu survei pada suatu titik dalam satuan waktu. Terdapat dua jenis penentuan lalu lintas harian berdasarkan lamanya waktu pengamatan adalah sebagai berikut :

- a. Lalu lintas harian rata-rata tahunan (LHRT), nilai ini diperoleh berdasarkan pengamatan jumlah kendaraan melintas selama satu tahun.

$$\text{LHRT} = \frac{\text{Jumlah kendaraan dalam 1 tahun}}{365} \dots\dots\dots (2.2)$$

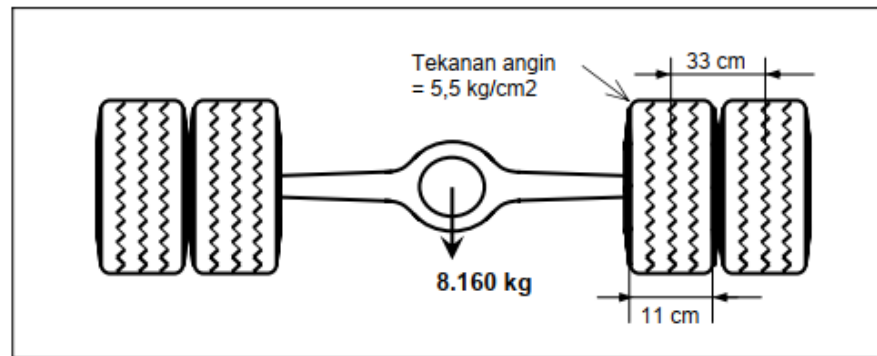
- b. Lalu lintas harian rata-rata (LHR), nilai ini diperoleh berdasarkan pengamatan jumlah kendaraan melintas berdasarkan waktu yang telah ditentukan.

$$\text{LHR} = \frac{\text{Jumlah kendaraan selama pengamatan}}{\text{Lamanya waktu pengamatan}} \dots\dots\dots (2.3)$$

3. Repetisi lintasan sumbu standar.

Pada dasarnya kendaraan memiliki berbagai macam konfigurasi sumbu, roda, dan beban kendaraanya. Oleh karena itu berbagai macam variasi tersebut diseragamkan menjadi satuan lintasan sumbu standar. Sumbu standar itu sendiri merupakan sumbu tunggal roda ganda yang memiliki kriteria sebagai berikut :

- Beban sumbu 8160 kg;
- Tekanan roda 1 ban $\pm 0,55$ Mpa;
- Lebar bidang kontak 11 cm; dan
- Jarak antara masing-masing sumbu roda ganda = 33 cm.



Sumber : Sukirman, (2010)

Gambar 2.2 Sumbu standar

2.2.2. Faktor Umur Rencana

Faktor umur rencana diperlukan dalam perhitungan repetisi lalu lintas selama umur rencana. Nilai faktor umur rencana dapat dihitung dengan pendekatan menggunakan rumus dibawah :

$$R = \frac{(1+i)^{UR}-1}{i} \dots\dots\dots (2.4)$$

Dimana :

i = laju pertumbuhan lalu lintas tahunan (%)

UR = Umur rencana (tahun)

2.2.3. Faktor Ekuivalen Beban (*Vehicle Damage Factor*)

Pada desain perkerasan, beban lalu lintas dikonversi menjadi beban standar (ESA) dengan menggunakan Faktor Ekuivalen Beban (*Vehicle Damage Factor*). Angka ekuivalen memiliki arti jumlah lintasan sumbu standar sumbu tunggal roda ganda yang memiliki beban 8160 kg mengakibatkan kerusakan yang sama pada struktur perkerasan jalan. Bina Marga (2017) memberikan rumus untuk menghitung nilai faktor ekuivalen beban seperti terlampir dibawah:

$$ESA4 = \left(\frac{L_{ij}}{SL}\right)^4 \dots\dots\dots (2.5)$$

Dimana :

L_{ij} = beban pada sumbu atau kelompok sumbu (kN)

SL = beban standar untuk sumbu atau kelompok sumbu

Beban sumbu standar (SL) kelompok sumbu kendaraan ditunjukkan dalam tabel berikut :

Tabel 2.1 Beban standar kelompok sumbu

Kelompok Sumbu	Beban Gandar (kN)
Sumbu tunggal roda tunggal	53
Sumbu tunggal roda ganda	80
Sumbu tandem roda tunggal	90
Sumbu tandem roda ganda	135
Sumbu tridem roda ganda	181
Sumbu empat (<i>quad axle</i>) roda ganda	221

Sumber : Bina Marga Manual desain perkerasan (2017)

2.2.4. Faktor Distribusi Lajur dan Distribusi Arah

Faktor distribusi lajur (DL) dan distribusi arah (DD) merupakan faktor yang perlu diperhitungkan dalam perhitungan lajur rencana. Lajur rencana merupakan salah satu lajur lalu lintas dari suatu ruas jalan yang menampung lalu lintas kendaraan.

Faktor distribusi lajur diperlukan dalam desain perkerasan untuk menyesuaikan beban kumulatif (ESA) pada jalan dengan dua lajur atau lebih dalam satu arah. Berikut disajikan nilai Faktor distribusi lajur berdasarkan jumlah lajur setiap arah:

Tabel 2.2 Faktor Distribusi Lajur (DL)

Jumlah lajur setiap arah	Kendaraan niaga pada lajur desain (% terhadap populasi kendaraan niaga)
1	100
2	80
3	60
4	50

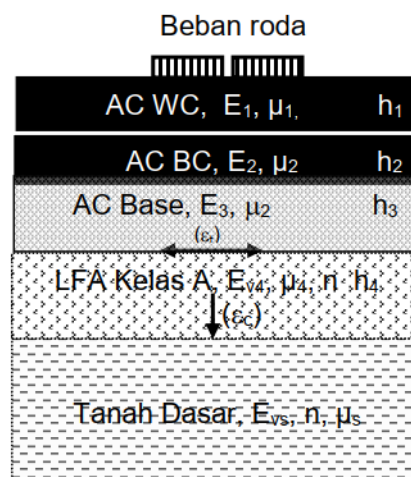
Sumber : Bina marga Manual desain perkerasan (2017)

Faktor distribusi arah (DD) perlu diperhitungkan dalam desain, pada umumnya nilai faktor distribusi arah (DD) diambil sebesar 0,50 untuk jalan 2 arah.

2.3. Regangan Pada Sistem Perkerasan Lentur

Pada Perkerasan lentur terdapat asumsi regangan yang terjadi akibat beban lalu lintas yaitu :

1. Regangan vertikal pada permukaan tanah dasar; dan
2. Regangan tarik horizontal yang terjadi pada serat bawah lapis berpengikat.



Sumber : Bina marga Manual desain perkerasan (2017)

Gambar 2.3 Regangan Pada Perkerasan Lentur

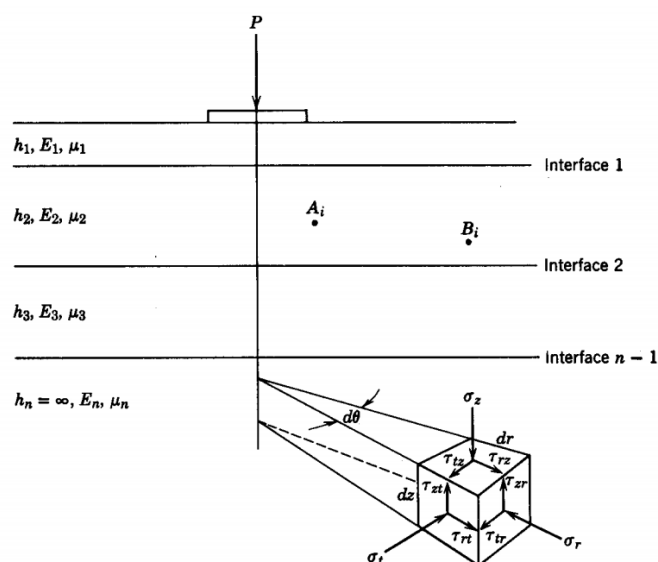
Regangan vertikal (ϵ_c) yang terjadi pada permukaan tanah dasar digunakan sebagai kontrol terhadap deformasi permanen. Regangan horizontal (ϵ_t) terjadi

pada serat bawah lapis berpegang digunakan sebagai kontrol terhadap kerusakan akibat kelelahan pada lapis permukaan.

2.4. Teori Sistem Lapis Banyak

Sistem lapis banyak merupakan konsep dengan metode mekanistik dalam desain struktur perkerasan. Hasil analisis dari struktur lapis banyak dapat berupa tegangan, rengangan, dan lendutan yang merupakan hasil respon dari stuktur perkerasan terhadap beban lalu lintas. Pada konsep sistem lapis banyak menggunakan beberapa asumsi dalam analisis tegangan, rengangan, dan lendutan. Diantaranya :

1. Sifat material dari setiap lapis diasumsikan homogen;
2. Friksi terjadi di setiap antar lapisan yang terletak di setiap permukaan lapisan;
3. Tiap lapisan mempunyai batas ketebalan, kecuali untuk lapisan paling bawah yaitu tanah dasar yang memiliki ketebalan tidak terbatas dan lebar setiap lapisan perkerasan dianggap tidak terbatas;
4. Gaya geser di permukaan dianggap tidak ada di lapisan permukaan;
5. Respon structural diwakilkan oleh dua material yaitu angka *poison* (μ) dan modulus elastisitas (E atau M_R)



Sumber : Yoder dan Witczak, (1975)

Gambar 2.4 Sistem Lapis Banyak

Yoder dan Witczak (1975), Memberikan teori dalam setiap lapisan terdapat beberapa tegangan yang bekerja didalamnya. Tegangan normal ($\sigma_z, \sigma_r, \sigma_t$) yang bekerja tegak lurus pada bagian permukaan. Tegangan geser ($\tau_{rt}, \tau_{tr}, \tau_{rz}, \tau_{zr}, \tau_{tz}, \tau_{zt}$) yang bekerja sejajar permukaan. Dengan menggunakan konsep kesetimbangan dapat dilihat bahwa tegangan geser yang bekerja pada tiap-tiap permukaan adalah sama besar yaitu $\tau_{rt}, \tau_{tr}, \tau_{rz}, \tau_{zr}, \tau_{tz}, \tau_{zt}$. Sehingga resultan tegangan geser sama dengan nol.

2.5. Kerusakan Pada Perkerasan Lentur

Kerusakan pada perkerasan merupakan hal yang pasti akan terjadi seiring dengan berjalannya waktu namun kerusakan pada perkerasan dapat terjadi lebih cepat dari pada masa umur rencana jalan tersebut. Hal ini dapat disebabkan oleh beberapa faktor seperti kesalahan dalam pelaksanaan, kondisi tanah yang kurang bagus, perubahan cuaca yang ekstrim, beban kendaraan yang berlebih, dll. Pada penelitian ini jenis kerusakan akan difokuskan pada retak leleh dan alur.

1. Retak leleh, Retak ini disebabkan oleh besarnya tegangan tarik yang terjadi sangat besar akibat beban berulang. Pada umumnya kerusakan ini dapat terjadi karena disebabkan oleh repetisi beban lalu lintas yang melampaui beban yang dapat dipikul oleh lapisan permukaan. Bina Marga (2017) memberikan hubungan antara regangan tarik maksimum akibat beban dan jumlah repetisi izin beban untuk mengetahui kinerja retak leleh pada perkerasan lentur seperti dirumuskan dibawah :

$$N = RF \left[\frac{6918 \times (0,856V_b + 1,08)}{S_{mix}^{0,36} \times \mu\epsilon} \right]^5 \dots\dots\dots (2.9)$$

Dimana :

- N = Jumlah repetisi izin beban
- $\mu\epsilon$ = Regangan Tarik akibat beban (*microstrain*)
- V_b = Volume aspal dalam campuran (%)
- S_{mix} = Modulus campuran beraspal (MPa)
- RF = Faktor reliabilitas

Berikut dilampirkan pada tabel 2.3 faktor reliabilitas retak lelah campuran beraspal dan tabel 2.5 mengenai persentase volume aspal berdasarkan bahan .

Tabel 2.3 Nilai faktor reliabilitas

Reliabilitas				
80%	85%	90%	95%	97,5%
2,5	2,0	1,5	1,0	0,67

Sumber : Bina marga Manual desain perkerasan (2017)

Austroad (2017) memberikan acuan dalam menentukan nilai faktor reliabilitas berdasarkan fungsi jalan. Berikut terlampir pada tabel 2.4 mengenai acuan pemilihan faktor reliabilitas berdasarkan fungsi jalan.

Tabel 2.4 Tipikal faktor reliabilitas berdasarkan fungsi Jalan

Fungsi Jalan	Faktor Reliabilitas (%)
Jalan bebas hambatan	95 – 97,5
Arteri: LHR > 2000	90 – 97,5
Arteri: LHR ≤ 2000	85 - 95
Kolektor: LHR > 500	85 – 95
Jalan lainnya: LHR ≤ 500	80 – 90

Sumber : *Austroad* (2017)

Tabel 2.5 Volume aspal berdasarkan bahan lapisan aspal

Bahan lapisan aspal	Volume aspal (V_b) (%)
HRS WC	16,4
HRS BC	14,8
AC – WC	12,2
AC – BC	11,5
AC – Base atau AC – BC sebagai lapis fondasi	11,5

Sumber : Bina marga Manual desain perkerasan (2017)

2. Alur (*ruts*), kerusakan diakibatkan oleh lemahnya tanah dasar, pemadatan yang kurang baik sehingga pada saat masa pelayanan struktur akan mengalami pemadatan tambahan akibat beban lalu lintas. Akibat terjadinya pemadatan tambahan, struktur perkerasan akan berbentuk alur sejajar dengan as jalan sehingga menyebabkan deformasi permanen pada jalan. Bina Marga (2017) memberikan model batasan regangan yang terjadi pada permukaan tanah dasar sebagai kontrol kinerja berdasarkan kerusakan alur yang dapat dirumuskan dibawah :

$$N = \left[\frac{9300}{\mu\varepsilon} \right]^7 \dots\dots\dots (2.10)$$

Dimana :

- N = Jumlah repetisi izin beban
 $\mu\varepsilon$ = Regangan tekan akibat beban (*microstrain*)

2.6. Perangkat Lunak PLAXIS 2D

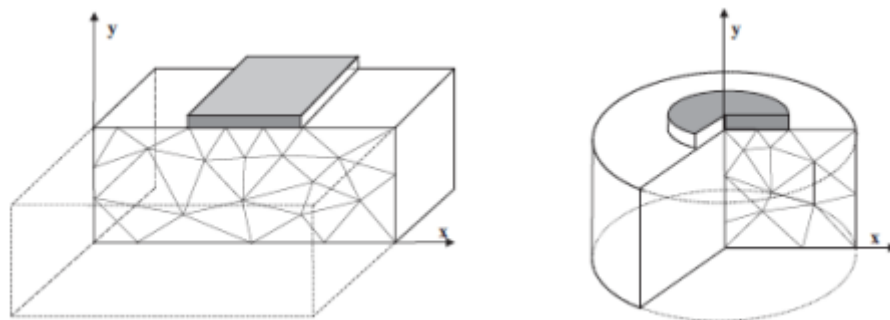
PLAXIS 2D merupakan *software* yang digunakan dalam bidang geoteknik dimana dalam plaxis ini digunakan untuk memudahkan dalam proses pemodelan dari suatu kasus yang berkaitan dengan bidang geoteknik. Pada *software* ini PLAXIS dikembangkan berdasarkan metode *finite element method* (metode elemen hingga).

2.6.1 Metode Elemen Hingga (*finite element method*)

Finite element method sendiri merupakan suatu metode pendekatan numerik untuk menyelesaikan persamaan kompleks dalam analisis struktural. Metode ini dapat digunakan apabila solusi eksak tidak dapat digunakan untuk menyelesaikannya. Dengan membagi sebuah objek menjadi elemen-elemen kecil hingga, kemudian dilakukan analisis lalu digabungkan kembali untuk mendapatkan hasil dari penyelesaian objek yang dimodelkan. Dimana pada proses penyelesaiannya dibantu dengan menggunakan *software* PLAXIS 2D.

2.6.2. Model Properti

Pada tahap awal pemodelan pada PLAXIS 2D perlu dilakukan pengaturan mengenai jenis struktur apa yang akan dimodelkan. Dalam PLAXIS 2D terdapat dua pengaturan model properti yang dapat digunakan yaitu model *plane strain* dan *Axisymmetri*.



Sumber : Manual PLAXIS 2D V21

(a) *Plane strain*

(b) *Axisymmetri*

Gambar 2.5 Model properti PLAXIS 2D

Plane strain merupakan model semi 3D yang lebih condong memodelkan sebuah struktur menerus seperti lereng tanah. Karena pada saat memodelkan satu bagian struktur per lapisan tanah dan suatu struktur, secara otomatis PLAXIS 2D akan menganggapnya sebagai struktur menerus pada saat proses analisisnya seperti contoh gambar (a).

Axisymmetri merupakan model semi 3d dimana pada saat memodelkan sebuah lapisan tanah dan suatu struktur maka secara otomatis PLAXIS 2D akan memodelkan dalam bentuk simetrinya sehingga apabila dimodelkan akan berbentuk menyerupai tabung seperti contoh gambar (b).

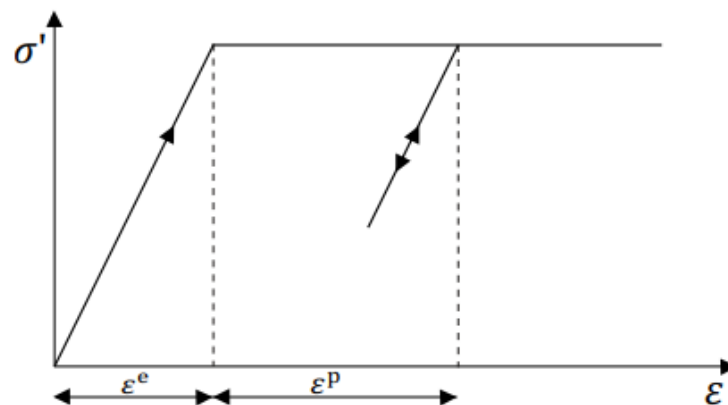
2.6.3. Model Material

Analisis tegangan-regangan pada tanah dapat dihitung dengan pemodelan material. Model yang ada pada PLAXIS 2D bermacam – macam, diantaranya model *Hardening soil*, *mohr coulomb*, *elastic linier* dan lain sebagainya. Pada

penelitian tugas akhir ini menggunakan model material *Mohr Coulomb*, *Hardening Soil* dan *Elastic Linear*.

1. *Mohr coulomb model*

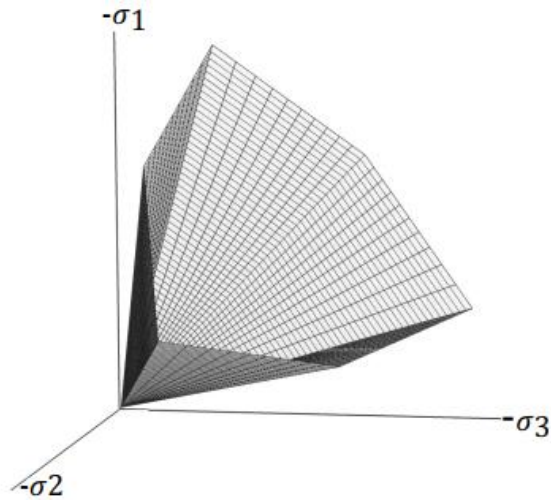
Mohr coulomb merupakan model material elastis plastis sempurna yang dikembangkan berdasarkan hukum elastisitas hooke. Berikut merupakan diagram tegangan regangan elastis plastis sempurna *mohr coulomb* yang ditunjukkan pada Gambar 2.4.



Sumber : Manual PLAXIS 2D V21

Gambar 2.6 Diagram dasar tegangan regangan plastis sempurna

Menurut Smith & Griffith (1982) dalam pemodelan *mohr coulomb* terdapat enam buah fungsi leleh saat diformulasikan dalam konteks tegangan utama dan dipengaruhi oleh parameter c dan f . Fungsi – fungsi leleh ini secara bersamaan membentuk kerucut heksagonal dalam ruang tegangan utama seperti ditunjukkan oleh Gambar 2.5.



Sumber : Manual PLAXIS 2D V21

Gambar 2.7 Bidang leleh *mohr coulomb* dalam ruang

Pada dasarnya model material *mohr coulomb* pada PLAXIS membutuhkan lima parameter dasar : modulus elastisitas (E), Poisson ratio ν , kohesi (c), sudut geser dalam (ϕ), dan sudut dilatasi (ψ).

2. *Hardening Soil*

Model material ini merupakan model untuk mengetahui perilaku tanah dengan lebih detail. Pada model material *mohr coulomb* hanya terdapat satu input parameter kekakuan, namun pada *hardening soil* terdapat tiga input material kekakuan sehingga akan lebih akurat dalam analisis numerik, diantaranya terdapat kekakuan pembebanan triaxial E_{50} , kekakuan *unloading* triaxial E_{ur} , dan kekakuan pembebanan oedometer E_{oed} . Parameter E_{50} adalah tegangan keliling yang bergantung pada modulus kekakuan untuk pembebanan primer dapat dirumuskan pada persamaan 2.11.

$$E_{50} = E_{50}^{ref} \left(\frac{c \cdot \cos(\phi) - \sigma'_3 \sin(\phi)}{c \cdot \cos(\phi) - p^{ref} \sin(\phi)} \right)^m \dots\dots\dots (2.11)$$

Dimana :

E_{50}^{ref} = Referensi Modulus kekakuan sesuai dengan tekanan keliling referensi p^{ref}

m = Power untuk tingkatan tegangan bergantung pada modulus kekakuan

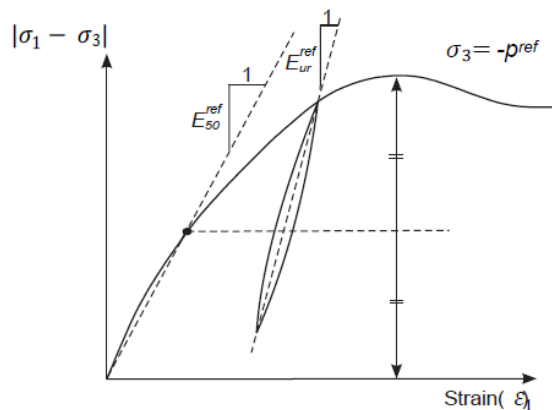
Untuk tegangan *unloading* dan *reloading* yang memiliki ketergantungan dengan modulus kekakuan dapat dirumuskan pada persamaan 2.12

$$E_{ur} = E_{ur}^{ref} \left(\frac{c \cdot \cos(\varphi) - \sigma'_3 \sin(\varphi)}{c \cdot \cos(\varphi) - p^{ref} \sin(\varphi)} \right)^m \dots\dots\dots (2.12)$$

Dimana :

E_{ur}^{ref} = Referensi Modulus kekakuan *unloading* dan *reloading*, sesuai dengan tekanan referensi p^{ref}

Dalam beberapa kasus, nilai $E_{ur}^{ref} = 3E_{50}^{ref}$; nilai ini digunakan sebagai pengaturan default. Hubungan tegangan regangan yang mendefinisikan E_{50}^{ref} dan E_{ur}^{ref} dilampirkan pada Gambar 2.6.



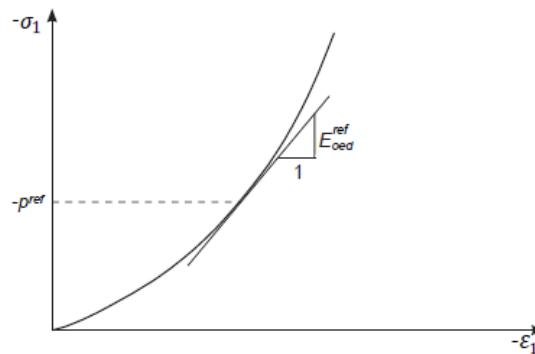
Sumber : Manual PLAXIS 2D V21

Gambar 2.8 Definisi E_{50}^{ref} dan E_{ur}^{ref} untuk hasil uji triaxial *drained*

Kemudian pada material model *hardening soil* terdapat parameter E_{oed}^{ref} . Parameter ini merupakan modulus kekakuan yang didapat dari pengujian oedometer dengan kompresi 1 arah. Kekakuan oedometer ini dapat dirumuskan pada persamaan 2.13.

$$E_{oed} = E_{oed}^{ref} \left(\frac{c \cdot \cos(\varphi) - \frac{\sigma'_3}{K_0^{nc}} \sin(\varphi)}{c \cdot \cos(\varphi) + p^{ref} \sin(\varphi)} \right)^m \dots\dots\dots (2.13)$$

Dimana E_{oed} merupakan tangensial modulus kekakuan yang diperoleh dari uji oedometer, seperti dilampirkan pada Gambar 2.7.



Sumber : Manual PLAXIS 2D V21

Gambar 2.9 Perolehan parameter E_{oed}^{ref} dari hasil uji oedometer

3. *Linear Elastic model*

Linear Elastic model biasa digunakan untuk memodelkan perilaku struktur seperti dinding beton atau pelat, yang memiliki kekuatan lebih tinggi apabila dibandingkan dengan tanah. Pada PLAXIS, model ini biasanya digunakan dengan tipe drainase *non-porous* agar tekanan air pori tidak diperhitungkan dalam struktur yang dipilih. Pada penelitian ini *linear elastic model* digunakan sebagai model tipe untuk lapisan aspal beton.

2.7. Penelitian Terdahulu

Hingga saat ini terdapat beberapa penelitian yang telah dilakukan dan digunakan sebagai dasar literatur dalam penelitian ini, diantaranya:

1. Ekwulo Emmanuel O dan Eme Dennis B. (2009). *Fatigue and rutting strain analysis flexible pavements designed using CBR methods*. Pada penelitian ini metode CBR digunakan oleh tiga prosedur diantaranya *Asphalt Institute CBR Method*, *National Crushes Stone Association (NCSA) CBR Method*, dan *Nigerian CBR Method*. Pada setiap pengembang menggunakan metode empiris dalam perhitungan analisisnya dan memberikan tebal minimum lapisan aspal berdasarkan repetisi lalu lintas. Dalam tahap analisis respon perkerasan ini menggunakan model Heukelom dan Klom (1962) dan *Asphalt Institute* (1982). Hasil analisis yang didapat berupa repetisi lalu lintas yang menyebabkan kegagalan struktur berdasarkan regangan tekan pada

permukaan tanah dasar dan regangan tarik pada serat bawah lapis aspal dengan model Heukelom dan Klom (1962) dan *Asphalt Institute* (1982). Adapun nilai CESA kritis yang didapat mengindikasikan kinerja struktur perkerasan lentur sebesar $1,2 \times 10^{10}$ ESA berdasarkan respon model Heukelom dan Klomp (1962).

2. Metwally G, Al-Taher., Hassan D, Hassanin., Mokhtar F, Ibrahim., & Ahmed M, Sawan. (2019). *Finite Element Analysis of Performance of Asphalt Pavement Mixtures Modified using Nano Additives*. Dibantu dengan *software* PLAXIS 2D penelitian ini bertujuan untuk mengetahui kinerja dari campuran aspal dengan bahan aditif nano. Pada penelitian ini menggunakan enam jenis campuran aspal dengan bahan aditif, diantaranya *Control mix, 10% Rubber, 4% LDPE, 5% Lime, 6% SF, and 7% NS*. Kemudian beban yang digunakan untuk memodelkan beban lalu lintas dimodelkan bertahap diantaranya 100 kPa, 200 kPa, 300 kPa, 400 kPa, 500 kPa, 600 kPa, dan 700 kPa. Setelah dianalisis kesimpulan yang didapat dari penelitian ini adalah sebagai berikut.
 - a) Nilai penurunan tidak terlalu signifikan berbeda; dan
 - b) Campuran aspal menggunakan *Silica Fume* dapat dipertimbangkan karena memberikan hasil yang lebih baik pada tegangan total dan juga memberikan nilai penurunan yang kecil sekitar 17% dari penurunan yang terjadi menggunakan campuran semula.
3. Hamdy Faheem, & Ahmed Mohamed Hassan. (2014). *2D PLAXIS Finite Element Modelling of Asphalt-Concrete Pavement Reinforced with Geogrid*. Pada penelitian ini Struktur perkerasan lentur dimodelkan menggunakan *software* PLAXIS 2D yang bertujuan untuk mengetahui kinerja struktur perkerasan dengan tambahan geogrid sebagai perkuatan. Beban yang dimodelkan dalam penelitian ini meliputi beban statik dan beban dinamik. Hasil yang didapat dari penelitian ini adalah sebagai berikut.
 - a) Besar penurunan dan tegangan efektif yang terjadi lebih rendah dengan adanya penambahan lapisan perkuatan dengan geogrid;

- b) Pada penggunaan beban dinamik, respon perkerasan tidak ada perubahan yang signifikan apabila dilakukan penambahan geogrid; dan
 - c) Pengaruh yang terjadi secara signifikan pada struktur perkerasan dengan kekuatan geogrid hanya terjadi pada amplitude tegangan tinggi.
4. Mega Teguh Budi Raharjo. (2012). **Analisis Struktur Jalan Raya dengan Menggunakan Software PLAXIS 3D Foundation Ditinjau Pada Perkerasan Lentur dan Kaku**. Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui kinerja dari perkerasan lentur dan perkerasan kaku dengan mengetahui besar penurunan/deformasi, tegangan, dan gaya dalam akibat beban lalu lintas dengan menggunakan metode elemen hingga yang dibantu dengan *software* PLAXIS 3D. Dengan metode ini diperoleh besarnya penurunan dan tegangan maksimum pada perkerasan lentur adalah $3,67 \times 10^{-5}$ m dan $23,39 \text{ kN/m}^2$, besarnya gaya aksial adalah $3,83 \text{ kN/m}$, gaya geser $1,07 \text{ kN/m}$, dan gaya momen $0,12327 \text{ kNm/m}$. Kemudian besarnya penurunan dan tegangan maksimum pada perkerasan kaku adalah $5,91 \times 10^{-6}$ dan $22,84 \text{ kN/m}^2$, besarnya gaya aksial adalah $3,66 \text{ kN/m}$, gaya geser $7,94 \text{ kN/m}$, dan gaya momen $1,01 \text{ kNm/m}$.
5. Imam Aschuri, & Hajra Maimuna Umarella. *The Effect of Compaction Temperatures of Asphalt Concrete Mixture on Axle Load Repetition*. Pada penelitian ini bertujuan untuk mengetahui pengaruh temperatur pada setiap pemadatan aspal beton untuk mengetahui perbedaan nilai kekakuan dan jumlah repetisi dapat diketahui dengan metode empiris. Penelitian ini menggunakan empat perbedaan suhu untuk setiap pemadatan campuran aspal beton yaitu 140°C , 130°C , 120°C , 110°C . Dengan menggunakan uji Marshall nilai kekakuan untuk setiap temperatur dapat diperoleh. Hasil yang didapat dari penelitian ini dengan suhu 140°C diperoleh nilai kekakuan $845,5 \text{ Mpa}$ kemudian dengan menggunakan metode empiris repetisi diperoleh sebesar $1,13 \times 10^8 \text{ lss/LR/UR}$ untuk AC WC 140.

2.7.1. Perbandingan Fokus Penelitian

Pada dasarnya penelitian terdahulu digunakan sebagai dasar literatur dalam penelitian yang akan dilakukan kali ini dan dari beberapa literatur yang digunakan terdapat perbedaan mengenai tujuan yang dicapai dengan penelitian yang akan dilakukan pada Tugas Akhir ini. Berikut merupakan perbandingan antara penelitian terdahulu dan penelitian yang akan dilakukan kali ini disajikan pada Tabel 2.6.

Tabel 2.6a Perbedaan Fokus dan Hasil Setiap Penelitian

No	Judul	Fokus Penelitian	Hasil Penelitian
Penelitian Terdahulu			
1	<i>Fatigue and rutting strain analysis flexible pavements designed using CBR methods</i>	Penelitian ini memiliki fokus pada analisis regangan tekan dan regangan tarik menggunakan <i>Asphalt Institute CBR Method</i> , <i>National Crushes Stone Association (NCSA) CBR Method</i> , dan <i>Nigerian CBR Method</i> .	Hasil yang didapat adalah perbandingan nilai CESA berdasarkan model Heukelom dan Klom (1962) dan <i>Asphalt Institute</i> (1982) untuk mengetahui kinerja perkerasan lentur dari analisis regangan berdasarkan ketiga prosedur yang digunakan.
2	<i>Finite Element Analysis of Performance of Asphalt Pavement Mixtures Modified using Nano Additives</i>	Penelitian ini memiliki fokus pada analisis kinerja dari beberapa campuran aspal dengan menggunakan aditif nano menggunakan <i>software PLAXIS 2D</i> .	Hasil yang didapat adalah kinerja dari setiap campuran aspal yang dimodifikasi berdasarkan nilai total tegangan dan besas penurunan yang terjadi dari setiap campuran yang digunakan.
3	<i>2D PLAXIS Finite Element Modelling of Asphalt-Concrete Pavement Reinforced with Geogrid</i>	Penelitian ini memiliki fokus pada analisis kinerja struktur perkerasan lentur dengan menggunakan geogrid sebagai perkuatan yang dibantu dengan <i>software PLAXIS 2D</i> sebagai penunjang dalam penelitian ini.	Hasil yang didapat adalah kinerja dari perbandingan penggunaan geogrid pada perkerasan lentur dan tanpa geogrid sebagai perkuatan dengan menggunakan besas penurunan dan besar tegangan efektif

Tabel 2.6b Perbedaan Fokus dan Hasil Setiap Penelitian (Lanjutan)

No	Judul	Fokus Penelitian	Hasil Penelitian
4	<i>The Effect of Compaction Temperatures of Asphalt Concrete Mixture on Axle Load Repetition</i>	Pada penelitian ini memiliki fokus untuk mengetahui nilai kekakuan berdasarkan pemadatan dengan suhu yang berbeda. Dengan diperolehnya nilai kekakuan, kemudian jumlah repetisi dapat diperoleh berdasarkan nilai kekakuan yang telah didapat dengan metode empiris	Hasil yang didapat adalah variasi nilai kekakuan berdasarkan perbedaan temperature pada saat pemadatan dan jumlah repetisi yang menyebabkan kegagalan struktur perkerasan berdasarkan nilai kekakuan yang diperoleh.
Penelitian sekarang			
1	<i>Repetition load based on fatigue and rutting strain of flexible pavement designed using numerical method</i>	Pada penelitian kali ini memiliki fokus terhadap kinerja perkerasan lentur berupa regangan tarik dan regangan tekan yang terjadi akibat beban lalu lintas untuk mengetahui nilai CESA dari setiap variasi kekakuan yang digunakan pada lapisan permukaan menggunakan PLAXIS 2D.	Hasil yang didapat adalah CESA kritis berdasarkan regangan vertikal dan horizontal dari setiap variasi kekakuan yang digunakan pada penelitian ini.