

TUGAS AKHIR

**PANJANG EFEKTIF LAPIS PEMBEDA YANG DIPERLUKAN
PADA PERSIMPANGAN BERLAMPU LALU LINTAS
PADA JALAN ARTERI LINGKAR UTARA YOGYAKARTA**



Disusun Oleh :

ACHMAD SAFEI

No. Mhs. : 91310140
NIRM : 910051013114120135

BUDI KURNIANTO

No. Mhs. : 91310190
NIRM : 910051013114120184

**JURUSAN TEKNIK SIPIL
FAKULTAS TEKNIK SIPIL DAN PERENCANAAN
UNIVERSITAS ISLAM INDONESIA
YOGYAKARTA**

1998

TUGAS AKHIR

**PANJANG EFEKTIF LAPIS PEMBEDA YANG DIPERLUKAN
PADA PERSIMPANGAN BERLAMPU LALU LINTAS
PADA JALAN ARTERI LINGKAR UTARA YOGYAKARTA**

**Diajukan kepada Universitas Islam Indonesia
untuk memenuhi sebagian persyaratan memperoleh
derajat sarjana pada Fakultas Teknik Sipil dan Perencanaan**

Disusun Oleh :

ACHMAD SAFEI

**No. Mhs. : 91310140
NIRM : 910051013114120135**

BUDI KURNIANTO

**No. Mhs. : 91310190
NIRM : 910051013114120184**

**JURUSAN TEKNIK SIPIL
FAKULTAS TEKNIK SIPIL DAN PERENCANAAN
UNIVERSITAS ISLAM INDONESIA
YOGYAKARTA
1998**

LEMBAR PENGESAHAN

TUGAS AKHIR

**PANJANG EFEKTIF LAPIS PEMBEDA YANG DIPERLUKAN
PADA PERSIMPANGAN BERLAMPU LALU LINTAS
PADA JALAN ARTERI LINGKAR UTARA YOGYAKARTA**

Disusun Oleh :

ACHMAD SAFEI


No. Mhs. : 91310140
NIRM : 910051013114120135

BUDI KURNIANTO

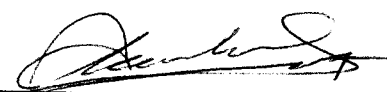
No. Mhs. : 91310190
NIRM : 910051013114120184

Telah diperiksa dan disetujui oleh :

Ir. H. Balya Umar, M.Sc
Pembimbing I


Tanggal : 13-04-1998

Ir. Subarkah, MT
Pembimbing II


Tanggal : 13-04-1998

KATA PENGANTAR

Bismillahirrahmaanirrohim

Assalamu'alaikum Wr. Wb.

Puji syukur dipanjatkan kehadirat Allah SWT, yang telah memberikan rahmat dan hidayah-Nya, sehingga Tugas Akhir ini dapat terselesaikan.

Tugas Akhir ini merupakan salah satu prasyarat yang harus dipenuhi oleh mahasiswa dalam memperoleh derajat kesarjanaan dalam bidang ilmu Teknik Sipil program Strata satu (S-1) pada Jurusan Teknik Sipil, Fakultas Teknik Sipil dan Perencanaan, Universitas Islam Indonesia, Yogyakarta.

Selama penyelesaian Tugas Akhir ini ada beberapa pihak yang telah membantu. Pada kesempatan ini kami ucapkan terimakasih yang sebesar-besarnya kepada:

1. Ir. H. Balya Umar, MSc, selaku pembimbing I yang telah memberikan bimbingan dan dorongan dalam penyusunan tugas akhir ini.
2. Ir. Subarkah, MT, selaku pembimbing II yang telah memberikan bimbingan dan dorongan dalam penyusunan tugas akhir ini.
3. Dekan Fakultas Teknik Sipil dan Perencanaan, Universitas Islam Indonesia, yang telah memberikan persetujuan atas Tugas Akhir ini.

4. Ketua Jurusan Teknik Sipil Fakultas Teknik Sipil dan Perencanaan Universitas Islam Indonesia.
5. Seluruh keluarga penyusun yang telah memberikan bantuan materi dan moral dalam penyusunan tugas akhir ini .
6. Rekan-rekan yang telah membantu dalam penyusunan tugas akhir ini.

Disadari bahwa penyusunan Tugas Akhir ini masih banyak kekurangan dan jauh dari sempurna. Kritik dan saran sangat dibutuhkan demi kesempurnaan Tugas Akhir ini.

Akhirnya diharapkan hasil yang disajikan dalam Tugas Akhir ini dapat membawa manfaat bagi pembaca, dan khususnya bagi diri penyusun.

Wassalamu'alaikum Wr. Wb.

Yogyakarta, Maret 1998

Penyusun

DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL	i
HALAMAN PERSEMBAHAN	ii
HALAMAN PENGESAHAN	iii
KATA PENGANTAR	iv
DAFTAR ISI	vi
DAFTAR TABEL	x
DAFTAR LAMPIRAN	xi
INTISARI	xii
BAB I PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Tujuan Penelitian	2
1.3 Manfaat Penelitian	2
1.4 Batasan Masalah	3

BAB II LANDASAN TEORI -----	4
2.1 Bahan Perkerasan Jalan -----	4
2.1.1 Aspal-----	4
2.1.2 Agregat-----	6
2.1.3 Filler -----	6
2.2 Persyaratan Bahan Perkerasan -----	7
2.3 Kekakuan Perkerasan-----	7
2.4 Parameter Kekakuan Perkerasan-----	8
2.4.1 Lama Pembebanan -----	8
2.4.2 Selisih Temperatur -----	9
2.4.3 Indeks Penetrasi (PI) -----	9
2.4.4 Komposisi Bahan dalam Campuran-----	10
2.5 Menentukan Kekakuan Bitumen (S bit) -----	11
2.6 Menghitung Kekakuan Perkerasan dengan Cara Analitis -----	11
2.7 Menghitung Kekakuan Perkerasan dengan Cara Grafis -----	12
2.8 Panjang Efektif Lapis Pembeda-----	13
2.9 Lampu Lalu Lintas -----	13
2.10 Jalan Arteri -----	14
2.11 Perancangan Tebal Perkerasan Dengan Metoda SHELL -----	15
2.11.1 Tanah Dasar-----	15
2.11.2 Lalu Lintas-----	15

2.11.3 Material Berbutir -----	17
2.11.4 Lapis Permukaan Beraspal -----	17
2.11.5 Faktor Regional -----	20
BAB III METODE PENELITIAN -----	22
3.1 Metode Penelitian -----	22
3.2 Pengumpulan Data -----	22
3.3 Analisis Data -----	23
BAB IV HASIL PENELITIAN DAN PEMBAHASAN -----	27
4.1 Panjang Efektif Lapis Pembeda -----	27
4.2 Perhitungan Kekakuan Bitumen (S bit) -----	30
4.3 Kekakuan Campuran Perkerasan (S mix) -----	33
4.3.1 Perhitungan S mix dengan Cara Analitis -----	34
4.3.2 Perhitungan S mix dengan Cara Grafis -----	39
4.4 Perhitungan Tebal Perkerasan -----	41
4.4.1 Tanah Dasar -----	41
4.4.2 Lalu Lintas -----	41
4.4.3 Material Berbutir -----	42
4.4.4 Lapis Permukaan Beraspal -----	42
4.4.5 Faktor Regional -----	43
4.4.6 Mix Code -----	43
4.4.7 Tebal Perkerasan -----	44

4.5 Pembahasan -----	45
4.5.1 Panjang Efektif Lapis Pembeda -----	45
4.5.2 Lapis Pembeda -----	45
BAB V KESIMPULAN DAN SARAN-----	46
5.1 Kesimpulan -----	46
5.2 Saran -----	46
DAFTAR PUSTAKA-----	48
LAMPIRAN	

DAFTAR TABEL

Tabel 4.1 Panjang Efektif Persimpangan Gejayan.....	27
Tabel 4.2 Panjang Efektif Persimpangan Kaliurang.....	28
Tabel 4.3 Panjang Efektif Persimpangan Monjali.....	28
Tabel 4.4 Lama Pembebanan	32
Tabel 4.5 Kekakuan Bitumen.....	33
Tabel 4.6 Kekakuan Campuran dengan Cara Grafis.....	40
Tabel 4.7 Jumlah Beban Gandar Standar.....	42

DAFTAR LAMPIRAN

Nomogram Kekakuan Bitumen.....	Lampiran 1
Nomogram Kekakuan Campuran.....	Lampiran 2
Grafik Korelasi Tanah Dasar.....	Lampiran 3
Grafik Faktor Konversi Beban Gandar	Lampiran 4
Grafik Mix Characteristic.....	Lampiran 5
Grafik Mix Characteristic Lama Pembebanan 0,02 dtk.....	Lampiran 6
Fatigue Characteristic.....	Lampiran 7
Weighting Factor.....	Lampiran 8
Grafik Tebal Perkerasan.....	Lampiran 9
Marshall Test Arteri Utara	Lampiran 10 - 13
Lokasi Penelitian	Lampiran 14
Fatigue.....	Lampiran 15 - 21

INTISARI

Perencanaan perkerasan lentur jalan raya di Indonesia tidak diperhitungkan terhadap kondisi lama pembebanan. Lama pembebanan pada ruas jalan mempengaruhi karakteristik dan tebal perkerasannya. Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui panjang efektif lapis pembeda berdasarkan lama pembebanannya. Penelitian ini tidak menganalisis penyebab kerusakan. Lokasi penelitian dilakukan pada persimpangan berlampu lalu lintas pada jalan arteri lingkaran Utara Yogyakarta. Pada persimpangan ini lalu lintasnya cukup padat dengan waktu pembebanan cukup lama.

Metode pada penelitian ini dilakukan dengan cara pengamatan dan pengukuran langsung dilapangan untuk menentukan panjang efektif lapis pembeda dan lama pembebanannya. Panjang efektif ditentukan berdasarkan panjang antrian kendaraan yang lolos dalam satu siklus lampu lalu lintas saat arus jenuh dan panjang akselerasi kendaraan untuk mencapai kecepatan normal (± 50 km/jam) dari keadaan berhenti. Lama pembebanan dibagi menjadi dua, yaitu lama pembebanan singkat berdasarkan kecepatan dan lama pembebanan panjang berdasarkan waktu merah dan keterlambatan kendaraan dalam bergerak ("starting loss time"). Hasil penelitian tersebut kemudian dianalisis untuk menentukan tebal perkerasan dengan menggunakan metode SHELL 1978 yang memperhitungkan nilai kekakuan ("stiffness modulus") berdasarkan lama pembebanannya.

Dari hasil penelitian didapat rata-rata panjang efektif berkisar antara 70-75 meter dengan lama pembebanan singkat 0,012 detik ($V=60$ Km/jam) dan lama pembebanan panjang 110 detik berdasarkan waktu periode lampu menyala merah (105 detik) dan starting loss time 5 detik. Analisis tebal perkerasannya didapat pada lama pembebanan 110 detik dibutuhkan tebal 15 cm sedangkan pada lama pembebanan 0,012 detik dibutuhkan tebal 6 cm.

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Jalan merupakan prasarana transportasi orang dan barang yang tidak dapat dipisahkan dari aktifitas manusia dan sangat berkait erat dengan peningkatan perekonomian suatu daerah. Salah satu cara untuk mewujudkan kondisi perekonomian yang baik bagi suatu daerah adalah meningkatkan prasarana transportasi dan pembukaan jalan baru yang akan membuka isolator suatu daerah terpencil dengan daerah yang lebih maju.

Pemerintah dalam hal ini Dinas Pekerjaan Umum terus berupaya mewujudkan peningkatan prasarana transportasi (jalan) dengan melakukan peningkatan dan perbaikan-perbaikan jalan pada jalan-jalan nasional, propinsi, dan jalan kabupaten. Pekerjaan pemeliharaan rutin juga dilakukan pada jalan-jalan tersebut, terutama mengadakan pemeliharaan jalan yang sudah ada yang merupakan prasarana transportasi utama penghubung antara kota yang satu dengan yang lainnya. Evaluasi untuk dapat dipilih alternatif terbaik dan paling efisien dalam pemeliharannya juga terus dilakukan.

Kenyataan yang ada menunjukkan bahwa perkembangan lalu lintas semakin lama mengalami peningkatan yang cukup pesat, sehingga jalan yang sudah ada tidak mampu lagi menahan beban-beban lalu lintas yang melewatinya. Akibatnya, jalan mengalami kerusakan sehingga keamanan dan kenyamanan pengguna jalanpun menjadi terganggu.

1.2 Tujuan Penelitian

Tujuan penelitian ini untuk mengetahui panjang lapis pembeda yang diperlukan pada persimpangan berlampu lalu lintas pada jalan arteri lingkaran utara Yogyakarta ditinjau dari lama pembebanan ("Loading Time") karena adanya perubahan kecepatan kendaraan, dari kecepatan normal sampai berhenti dan sebaliknya.

1.3 Manfaat Penelitian

Hasil penelitian ini diharapkan dapat berguna sebagai bahan pertimbangan untuk perencanaan ataupun untuk mengatasi kasus-kasus sejenis dimana perkerasan mengalami pembebanan yang cukup lama, khususnya pada daerah sekitar persimpangan berlampu lalu lintas.

1.4 Batasan Masalah

Agar penelitian dapat terarah sesuai dengan maksud dan tujuan penelitian, maka perlu diberi batasan dalam penelitian ini. Batasan penelitian untuk mengetahui panjang efektif lapis pembeda, yaitu :

1. penelitian ini tidak menganalisa penyebab kerusakan,
2. penelitian ini tidak melakukan revisi atau pengkajian ulang terhadap struktur perkerasan yang sudah ada, dan
3. batas wilayah penelitian ini meliputi perempatan Monumen Yogya Kembali, perempatan jalan Kaliurang, dan perempatan Gejayan dimana ketiga wilayah tersebut berpotongan dengan jalan arteri.

BAB II

LANDASAN TEORI

2.1 Bahan Perkerasan Jalan

Bahan penyusun perkerasan lentur terdiri dari aspal, agregat, dan filler. Bahan-bahan tersebut harus memenuhi persyaratan/spesifikasi yang telah ditetapkan Bina Marga.

2.1.1 Aspal

Aspal adalah material yang bersifat “viscous liquid” tersusun dari campuran hidrokarbon dan semua turunannya yang dapat larut dalam carbon disulfida. Pada dasarnya aspal merupakan bahan yang tidak dapat menguap (“non volatile”) dan dapat berangsur-angsur menjadi lunak meleleh bila dipanaskan. Aspal juga berupa material padat berwarna hitam atau coklat dan tidak tembus air (“waterproof”) serta bersifat kohesif (“cohesive properties”).

Aspal dalam campuran perkerasan berfungsi sebagai bahan ikat antar agregat. Sebagai salah satu bahan perkerasan lentur, aspal merupakan salah satu komponen kecil, umumnya hanya 4 - 10 % berdasarkan berat atau 10 - 15 % berdasarkan volume, tetapi merupakan komponen yang relatif mahal.

Menurut asalnya aspal dapat digolongkan menjadi dua bagian seperti berikut ini.

1. Aspal minyak (“petroleum bitumen”)

Aspal minyak diperoleh dari hasil penyulingan minyak bumi. Oleh karena derajat kekerasan aspal ini dapat di ukur dengan uji standar (“standard penetration test”), maka aspal ini juga dikenal sebagai “Penetration Grade Bitumen”.

2. Aspal alam / batuan (“rock asphalt”)

Aspal batuan ini terdapat sebagai bagian yang tercampur dengan batuan (dalam batuan) kapur atau pasir. Kadar aspal sangat bervariasi antara satu daerah dengan daerah lainnya (4 - 12 %). Pengolahannya dilakukan dengan cara penambangan batu yang mengandung aspal kemudian di pecah-pecah dengan mesin pemecah batu (“stone crusher”). Aspal dikeluarkan dari celah mineral batuan dengan bahan pelarut. Hasil yang diperoleh kurang lebih memiliki kadar aspal 7 %.

Aspal dibentuk oleh unsur berikut ini :

- a. asphaltenes, merupakan bagian utama dari aspal (“body of bitumen”) dengan berat molekul besar,
- b. maltenes / resins, merupakan unsur yang memberikan efek adhesive (lekatan) dan efek ductile (lentur) dengan berat molekul sedang, dan
- c. oils, mempunyai berat molekul rendah serta memberi efek viskositas dan efek flow.

Berdasarkan unsur pembentuknya, aspal merupakan suspensi koloidal dari asphaltenes dalam media minyak dengan resins berperan sebagai bahan pencegah penggumpalan atau pencegah koagulasi.

2.1.2 Agregat

Agregat adalah sekumpulan butir-butir batu pecah bulat, pasir atau mineral lainnya baik berupa agregat hasil alam maupun hasil pengolahan (penyaringan, pemecahan). Pada bahan perkerasan lentur agregat merupakan komponen utamanya yaitu mengandung 90 - 95 % agregat berdasarkan persentase berat atau 75 - 85 % agregat berdasarkan persentase volume. Dengan demikian, daya dukung, keawetan, dan mutu perkerasan jalan ditentukan juga dari sifat agregat dan hasil campuran agregat dengan bahan lain.

Pemilihan jenis agregat yang sesuai untuk dipergunakan pada struktur perkerasan dipengaruhi oleh beberapa faktor, yaitu ukuran dan gradasi, kekuatan dan kekerasan, tekstur permukaan, porositas, kelekatan terhadap aspal dan kebersihannya.

2.1.3 Filler

Filler pada campuran beton aspal adalah bahan berbutir halus yang berfungsi sebagai butiran pengisi rongga diantara partikel agregat kasar dalam rangka mengurangi besarnya rongga, meningkatkan kerapatan, dan stabilitas. Filler ini didefinisikan sebagai fraksi debu mineral lolos saringan no. 200 (0,075 mm) dapat berupa debu batu kapur, debu dolomit, atau semen.

2.2 Persyaratan Bahan Perkerasan

Agar didapatkan lapis perkerasan yang kuat, awet, aman dan nyaman maka struktur perkerasan jalan harus mempunyai karakteristik tertentu. Karakteristik dari permukaan jalan sangat bergantung pada bahan susunnya, khususnya perilaku aspal jika telah berada dalam campurannya. Syarat-syarat yang harus dipenuhi oleh campuran perkerasan adalah seperti berikut ini.

1. Stabilitas
2. Fleksibilitas
3. Keawetan (Durabilitas)
4. Kekesatan (“Skid Resistance”)
5. Kekakuan (“Stiffness”)

2.3 Kekakuan Perkerasan

Salah satu persyaratan agar perkerasan dapat berfungsi dengan baik adalah dengan mempunyai kekakuan (“stiffness”) yang cukup. Kekakuan yang cukup akan bermanfaat dalam menyebarkan beban lalu lintas dan menurunkan tekanan yang di terima oleh lapis di bawahnya.

Kekakuan perkerasan dapat dihitung dengan dua cara, yaitu :

1. cara analitis, dan
2. cara grafis (nomogram).

Pada penelitian ini, kedua cara tersebut dipakai sebagai bahan pembandingan diantara keduanya. Pada perhitungan kekakuan perkerasan dengan cara analitis maupun grafis, terlebih dahulu dihitung kekakuan aspalnya. Perhitungan kekakuan aspal ditentukan dengan nomogram Shell (lampiran 1).

2.4 Parameter Kekakuan Perkerasan

2.4.1 Lama Pembebanan

Lama pembebanan di atas permukaan jalan ditentukan berdasarkan kecepatan dan waktu hilang pada saat terjadi arus jenuh.

1. Berdasarkan Kecepatan

Jika lama pembebanan (t), panjang bidang kontak roda kendaraan pada jalan adalah (L) dan kecepatan kendaraan (V), maka lama pembebanan dapat dihitung dengan rumus sebagai berikut :

$$t = \frac{L}{V} \text{ (detik)}$$

2. Berdasarkan Waktu Hilang

Waktu hilang ("Lost Time") adalah waktu yang hilang selama periode merah dan waktu keterlambatan kendaraan dalam bergerak pada kondisi arus jenuh. Besarnya keterlambatan kendaraan dalam bergerak berubah-ubah, tergantung pada kondisi tempat dan faktor-faktor lain.

2.4.2 Selisih Temperatur

Selisih temperatur merupakan selisih antara temperatur titik lembek aspal / “softening point” dengan temperatur perkerasan di lapangan (SHELL,1978).

$$T = SP - T_{\text{perk.}} \text{ (} ^\circ\text{C)}$$

dengan :

T = selisih temperatur

SP = temperatur titik lembek aspal

T_{perk.} = temperatur perkerasan

Temperatur titik lembek aspal diperoleh dari pengujian “ring and ball test” yaitu temperatur pada saat aspal mulai lunak. Dua aspal yang mempunyai penetrasi sama belum tentu mempunyai temperatur titik lembek yang sama.

Temperatur perkerasan merupakan temperatur di lapangan, yaitu temperatur lapis permukaan perkerasan pada saat ada beban lalu lintas. Temperatur perkerasan ini sangat dipengaruhi oleh kondisi iklim pada suatu daerah, dimana terjadi perubahan yang mencolok pada pergantian musim.

2.4.3 Indeks Penetrasi (PI)

Nilai indeks penetrasi menunjukkan kepekaan (kekerasan) bitumen/aspal terhadap perubahan temperatur. Nilai indeks penetrasi ditentukan dengan dua nilai penetrasi pada temperatur yang berbeda, yaitu penetrasi 800 dan penetrasi tes (penetrasi 70).

Nilai indeks penetrasi ditentukan dengan formula seperti di bawah ini (Robert N.Hunter,1994) :

$$\frac{\log \text{pen2} - \log \text{pen1}}{T2 - T1} = \frac{1}{50} \times \frac{20 - \text{PI}}{10 + \text{PI}}$$

keterangan :

pen2 : penetrasi 800

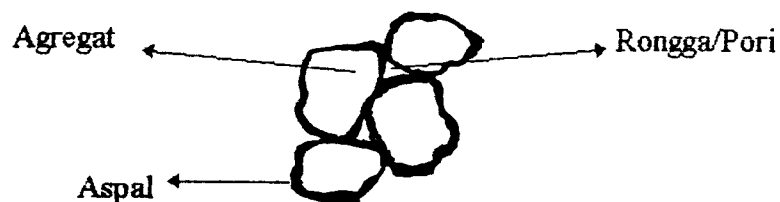
T2 : temperatur pada penetrasi 800

pen1 : penetrasi test

T1 : temperatur pada penetrasi test

2.4.4 Komposisi Bahan dalam Campuran

Komposisi bahan dalam campuran perkerasan diperoleh dari pengujian laboratorium, selanjutnya didapat persentase bahan dalam campuran perkerasan (% aspal, % agregat dan % rongga). Gambar 2.1 berikut memperlihatkan komposisi bahan tersebut.



Gambar 2.1 Komposisi bahan dalam campuran

2.5 Menentukan Kekakuan Bitumen (S bit)

Kekakuan bitumen ditentukan dengan membaca hasil yang didapat dari nomogram Shell dengan menghubungkan data perhitungan sebelumnya. Cara pembacaannya adalah sebagai berikut, garis yang menghubungkan titik lama pembebanan (t) dan selisih temperatur (T) akan berpotongan dengan garis indeks penetrasi (PI) selanjutnya diperoleh kekakuan bitumen (S bit).

2.6 Menghitung Kekakuan Perkerasan dengan Cara Analitis

Kekakuan perkerasan (campuran) dapat dihitung secara analitis dengan formula seperti tertera dibawah ini (SHEEL,1978).

$$S_{mix} = S_{bit} \left[1 + \frac{2,5}{n} \times \frac{C_v}{1 - C_v} \right]^n$$

$$n = 0,83 \text{Log} \left[\frac{4 \times 10^{10}}{S_{bit}} \right]$$

$$C_v = \frac{\text{volume agregat}}{\text{vol. agregat} + \text{vol. bitumen}} = \frac{V_g}{V_g + V_b}$$

keterangan :

C_v = konsentrasi volume (%)

S_{mix} = kekakuan perkerasan (N/m^2) atau Pa

S_{bit} = kekakuan bitumen (N/m^2) atau Pa

Persamaan tersebut valid untuk % voids ≤ 3 %, bila % voids > 3 % persamaan tersebut di modifikasi menjadi sebagai berikut :

$$Cv' = \frac{Cv}{1 + (Vv - 0,03)}$$

Vv = % voids (dalam desimal)

Persamaan ini dapat digunakan jika memenuhi syarat sebagai berikut :

$$Cb \geq 2/3 (1 - Cv')$$

$$Cb = \frac{\text{volume bitumen}}{\text{vol. agregat} + \text{vol. bitumen}}$$

2.7 Menghitung Kekakuan Perkerasan dengan Cara Grafis

Perhitungan kekakuan perkerasan dengan cara grafis dilakukan dengan pembacaan pada nomogram Shell (lampiran 2).

Cara pembacaannya adalah sebagai berikut, garis yang menghubungkan kekakuan bitumen (S bit) dengan volume bitumen (V_b) akan berpotongan dengan garis volume agregat (V_g) selanjutnya diperoleh kekakuan campuran (S mix).

2.8 Panjang Efektif Lapis Pembeda

Panjang efektif lapis pembeda adalah panjang lapis perkerasan yang nilai kekakuannya berbeda. Perbedaan tersebut akibat adanya perubahan kecepatan sehingga lama pembebanan yang terjadi pada suatu titik ruas jalan menjadi berbeda, khususnya pada daerah persimpangan berlampu lalu lintas. Data-data yang diperlukan untuk menentukan panjang efektif lapis pembeda ini yaitu :

1. panjang kapasitas antrian kendaraan yang lolos dalam satu siklus lampu lalu lintas pada jam sibuk (kondisi jenuh), dan
2. panjang yang dibutuhkan kendaraan untuk melakukan akselerasi sampai mencapai kecepatan normal dari keadaan berhenti.

2.9 Lampu Lalu Lintas

Lampu lalu lintas didefinisikan sebagai semua peralatan pengatur lalu lintas yang menggunakan tenaga listrik kecuali flasher (lampu kedip), rambu, dan marka jalan. Setiap pemasangan lampu lalu lintas bertujuan untuk memenuhi satu atau lebih fungsi-fungsi yang tersebut dibawah ini (Clarkson H. Oglesby, 1990).

1. Mendapatkan gerakan lalu lintas yang teratur.
2. Meningkatkan kapasitas ruas jalan pada perempatan.
3. Mengurangi frekuensi jenis kecelakaan tertentu.
4. Mengkoordinasikan lalu lintas di bawah kondisi jarak sinyal yang cukup baik, sehingga aliran lalu lintas tetap berjalan menerus pada kecepatan tertentu.

5. Memutuskan arus lalu lintas tinggi agar memungkinkan adanya penyeberangan kendaraan lain atau pejalan kaki.
6. Mengatur penggunaan jalur lalu lintas.

2.10 Jalan Arteri

Berdasarkan fungsinya, jalan arteri adalah jalan yang melayani angkutan utama dengan ciri-ciri perjalanan jarak jauh, kecepatan rata-rata tinggi, dan jumlah jalan masuk dibatasi secara efisien.

Jalan arteri dapat digolongkan menjadi jalan arteri primer dan jalan arteri sekunder. Jalan arteri lingkaran utara Yogyakarta termasuk dalam kategori jalan arteri primer, dilihat dari persyaratan yang harus dipenuhi untuk kategori jalan arteri primer. Adapun persyaratan yang harus dipenuhi oleh jalan arteri primer itu adalah seperti berikut ini.

1. Kecepatan rencana > 60 km/jam.
2. Lebar badan jalan > 8,0 meter.
3. Kapasitas jalan lebih besar dari volume lalu lintas rata-rata.
4. Jalan masuk dibatasi secara efisien sehingga kecepatan rencana dan kapasitas jalan dapat tercapai.
5. Tidak boleh terganggu oleh kegiatan lokal, lalu lintas lokal, dan lalu lintas ulang alik.
6. Tidak terputus walaupun melalui kota.

7. Tingkat kenyamanan dan keamanan yang dinyatakan dengan indeks permukaan tidak kurang dari 2.

2.11 Perancangan Tebal Perkerasan Dengan Metoda SHELL 1978

Penentuan tebal perkerasan pada ruas panjang efektif digunakan perancangan tebal perkerasan dengan metoda SHELL 1978. Metoda ini memperhitungkan nilai modulus kekakuan berdasarkan lama pembebanan.

2.11.1 Tanah Dasar

Kekuatan dan keawetan struktur tergantung pada sifat-sifat dan daya dukung tanah dasar. Dalam metoda ini kekuatan dari tanah dasar dinyatakan dengan nilai modulus dinamik (E_3). Penentuan nilai modulus dinamik ini dimudahkan dengan memakai grafik korelasi (lampiran 3). Berdasarkan atas percobaan yang dilakukan ternyata nilai modulus dinamik E_3 (N/m^2) adalah setara dengan 10^7 CBR. Tetapi untuk tanah plastis dengan nilai CBR yang rendah, nilai E_3 setara dengan nilai 2×10^7 CBR.

2.11.2 Lalu Lintas

Besaran yang digunakan dalam perancangan tebal perkerasan berkaitan dengan data lalu lintas, dipengaruhi oleh jenis kendaraan, volume lalu lintas dan pola operasi. Peranan jenis kendaraan pada besarnya beban gandar yang akan didukung oleh struktur perkerasan. Data volume lalu lintas digunakan dalam perhitungan jumlah beban yang

akan terjadi selama umur rencana. Pola operasi kendaraan adalah mengenai kecepatan kendaraan, yang berpengaruh terhadap waktu pembebanan. Analisis lalu lintas untuk penentuan tebal struktur perkerasan, di dasarkan atas data lalu lintas pada lajur rencana atau "design lane".

1. Jenis dan Volume Lalu Lintas

Menurut metoda SHELL 1978 ini, faktor lalu lintas dinyatakan sebagai "cumulative equivalent number of standard axle perlane (N)". Beban gandar yang dipakai adalah sebesar 80 kN, dimana setiap gandar standar dianggap terdiri dari dua roda ganda 20 kN. Masing-masing roda tersebut memberikan tekanan sebesar 6×10^6 N/m² terhadap permukaan struktur perkerasan.

Beban lalu lintas dihitung berdasarkan atas jumlah gandar yang lewat pada lajur rencana. Beban gandar dari kendaraan tersebut dikorelasikan terhadap beban gandar standar 80 kN dengan menggunakan angka konversi ("Conversion Factor, Ne") yang besarnya dapat dihitung dengan persamaan :

$$Ne = 2,4 \times 10^{-8} \times L^4$$

Nilai L adalah besarnya beban gandar yang lewat dalam satuan kN. Faktor konversi (Ne) ini dapat juga dicari dengan bantuan grafik seperti terlihat pada lampiran 4.

2. Kecepatan Kendaraan

Kecepatan kendaraan yang digunakan sebagai data dalam perancangan ini adalah kecepatan kendaraan pada lajur rencana yaitu sepanjang panjang efektif yang di

tinjau. Pengaruh kecepatan kendaraan adalah terhadap lama pembebanan yang akhirnya akan menentukan kekakuan bahan ikat (aspal).

2.11.3 Material Berbutir

Menurut metoda SHEEL (1978) ini, pada umumnya bagi setiap struktur perkerasan lentur, lapis “unbound layer” terdiri atas dua atau tiga lapis dengan masing-masing memiliki syarat kepadatan tertentu. Ukuran dari kekuatan lapisan yang tak terikat bahan bitumen ini dinyatakan dalam nilai modulus dinamikinya (E_2). Grafik korelasi antara nilai modulus dinamik dengan nilai dari pengukuran kepadatan untuk menentukan kekuatan unbound layer seperti terlihat pada lampiran 3. Hal ini dikarenakan untuk mengukur nilai modulus dinamik secara langsung dilapangan cukup sulit dilakukan.

2.11.4 Lapis Permukaan Beraspal

Besaran rencana yang menyangkut permukaan beraspal diperoleh dari dua sifat penting yang sangat berpengaruh terhadap kualitas campuran tersebut. Kedua sifat itu adalah karakteristik kekakuan campuran lapis aspal (“Mix Stiffness Characteristic”) dan karakteristik kelelahan campuran (“Fatigue Characteristic”).

Selain dari kedua hal tersebut diatas, untuk bisa menggunakan grafik-grafik penentuan tebal perkerasan dalam metoda SHELL 1978 ini masih diperlukan sebuah data lagi, yaitu penetrasi aspal.

1. Mix Stiffness Characteristic

Kekakuan campuran dari permukaan beraspal hanya bergantung pada kekakuan bahan ikat dan volume penyusunnya yang meliputi aspal, agregat dan rongga udara. Sedangkan untuk nilai kekakuan yang rendah, pada temperatur yang tinggi atau pada waktu pembebanan yang panjang, selain bergantung pada kekakuan bahan ikat dan perbandingan volume bahan penyusunnya, kekakuan campuran tersebut juga bergantung pada gradasi agregat.

Untuk memudahkan dalam menentukan mix code suatu campuran, disajikan pedoman sifat-sifat dari kelompok S1 dan S2, yaitu :

- a. Kelompok S1 : campuran dengan perbandingan volume yang seimbang antara agregat, bitumen dan rongga udara.
- b. Kelompok S2 : campuran "open graded" dengan volume bitumen yang sedikit, tetapi terdapat rongga udara yang relatif banyak.

Selain itu karakteristik campuran (S1 dan S2) juga dapat ditentukan dengan grafik M1 dan M2 sebagaimana terlihat pada lampiran 5 dan 6. Grafik M1 merupakan hubungan antara kekakuan campuran (S_{mix}) dan kekakuan bahan ikat aspal (S_{bit}), sedangkan grafik M2 menunjukkan kekakuan campuran (S_{mix}) dan temperatur pada waktu pembebanan 0,02 detik.

2. Mix Fatigue Characteristic

Sebagaimana telah diuraikan didepan, bahwa karakteristik kelelahan campuran dibedakan menjadi dua kelompok F1 dan F2. Grafik karakteristik kelelahan ini dapat dilihat pada lampiran 7, yaitu grafik M3 dan M4.

Pada perancangan tebal perkerasan, metoda ini telah menyediakan suatu patokan sebagai gambaran dasar untuk mempermudah dalam penentuan karakteristik kelelahan suatu campuran aspal, yaitu :

F1 : campuran dengan jumlah kandungan rongga udara antara 2% - 7%.

F2 : campuran dengan jumlah kandungan rongga udara relatif banyak, yaitu lebih besar dari 7%.

3. Penetrasi Bahan Ikat Aspal

Salah satu ukuran kekentalan bahan ikat aspal adalah penetrasinya. Penentuan penetrasi aspal biasanya dilakukan di laboratorium pada suhu 25°C. Pada metode SHEEL 1978 ini bahan ikat aspal dikelompokkan menjadi dua yaitu kelompok 50 pen dan kelompok 100 pen.

a. Kelompok 50 pen : dianggap sebagai kelompok yang mewakili aspal dengan penetrasi 40/50, 40/60, 45/60.

b. Kelompok 100 pen : dianggap sebagai kelompok yang mewakili aspal dengan penetrasi 80/100, 85/100, 80/120.

Berdasarkan kekakuan campuran, kelelahan serta penetrasi aspal dibuat suatu "Mix Code" yang menyatakan kualitas dari lapis aspal. Pada mix code ini kekakuan

campuran lapis aspal dinyatakan sebagai S1 dan S2, karakteristik kelelahan campuran dinyatakan sebagai F1 dan F2, sedangkan penetrasi aspal dibagi dalam dua kelompok yaitu 50 pen dan 100 pen. Terdapat delapan kemungkinan untuk mix code lapis aspal, yaitu :

1. S1 - F1 - 50
2. S1 - F1 - 100
3. S2 - F1 - 50
4. S2 - F1 - 100
5. S1 - F2 - 50
6. S1 - F2 - 100
7. S2 - F2 - 50
8. S2 - F2 - 100

2.11.5 Faktor Regional

Faktor regional adalah faktor yang berasal dari luar struktur perkerasan, selain beban lalu lintas. Faktor regional ini biasanya berupa kondisi alami ditempat struktur perkerasan berada dan tidak jarang menimbulkan gangguan cukup besar serta mengakibatkan kerusakan yang parah pada struktur tersebut.

Pada perancangan perkerasan lentur metoda SHELL ini, faktor regional yang dianggap penting dan dipakai sebagai besaran rencana adalah temperatur udara, karena suhu udara akan berpengaruh pada lapis permukaan beraspal. Temperatur udara

sebagai faktor regional dinyatakan sebagai “Weighted Mean Annual Air Temperature (w-MAAT)”. Beban suhu (w-MAAT) merupakan suatu suhu yang diperkirakan dapat mewakili pengaruh suhu pada perkerasan.

Besarnya suhu dihitung dengan menggunakan data suhu rata-rata bulanan, “Monthly Mean Air Temperature (MMAT)”. Nilai w-MAAT bukan merupakan nilai rata-rata dari MMAT melainkan merupakan nilai yang diperoleh dengan menggunakan “Weighting Factor” seperti terlihat pada lampiran 8.

BAB III

METODE PENELITIAN

3.1 Metode Penelitian

Sistematika penelitian ini dilakukan dengan urutan sebagai berikut:

1. peninjauan lapangan,
2. pengumpulan data,
3. analisis data, dan
4. kesimpulan.

Diagram alir sistematika metode penelitian ini secara lengkap dapat dilihat pada Gambar 3.1, Gambar 3.2, dan Gambar 3.3.

3.2 Pengumpulan Data

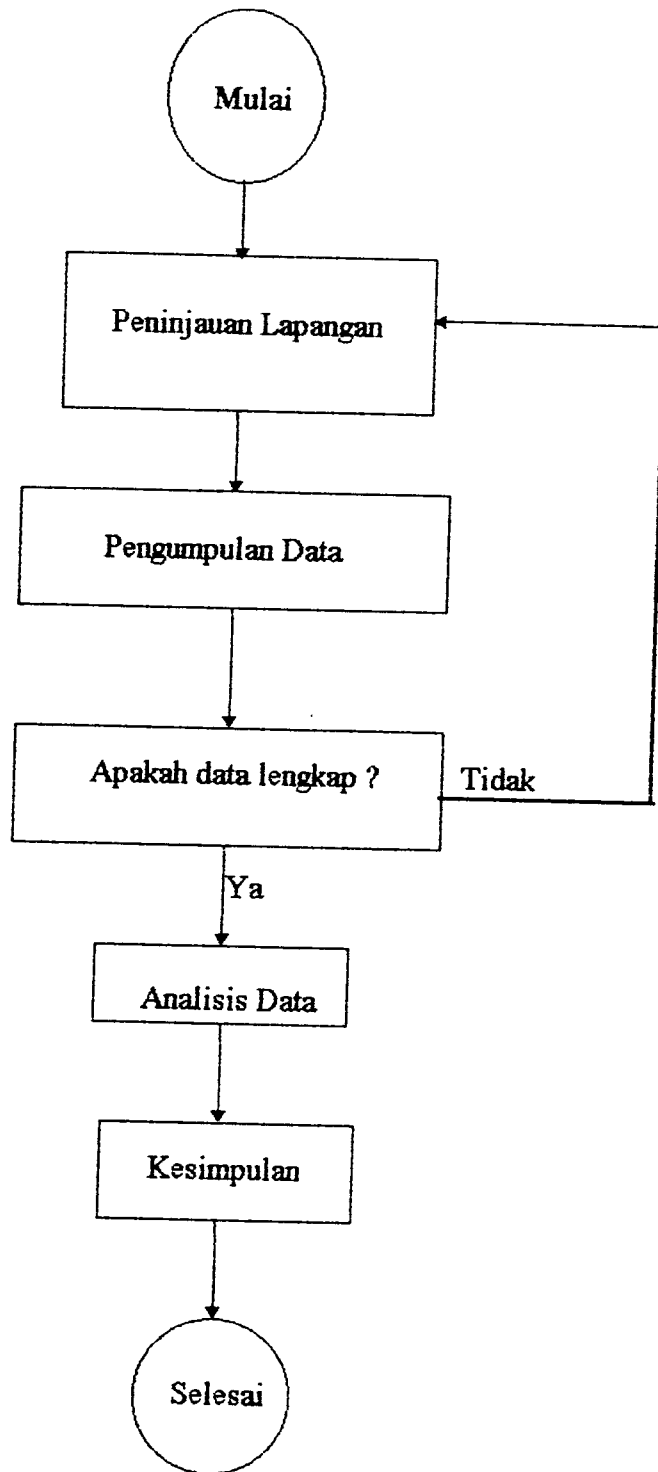
Data diperlukan untuk menentukan panjang efektif serta kekakuan perkerasan pada persimpangan berlampu lalu lintas pada jalan arteri lingkaran utara Yogyakarta. Pada penelitian ini, data-data yang diperlukan tersebut diperoleh dari pengamatan/pengukuran langsung di lapangan dan dari Dinas Pekerjaan Umum Propinsi DIY melalui sub dinas Direktorat Jendral Bina Marga pada Bagian Proyek Rehabilitasi

/ Pemeliharaan Jalan Nasional Seksi Sleman. Peralatan yang diperlukan untuk memperoleh data lapangan adalah :

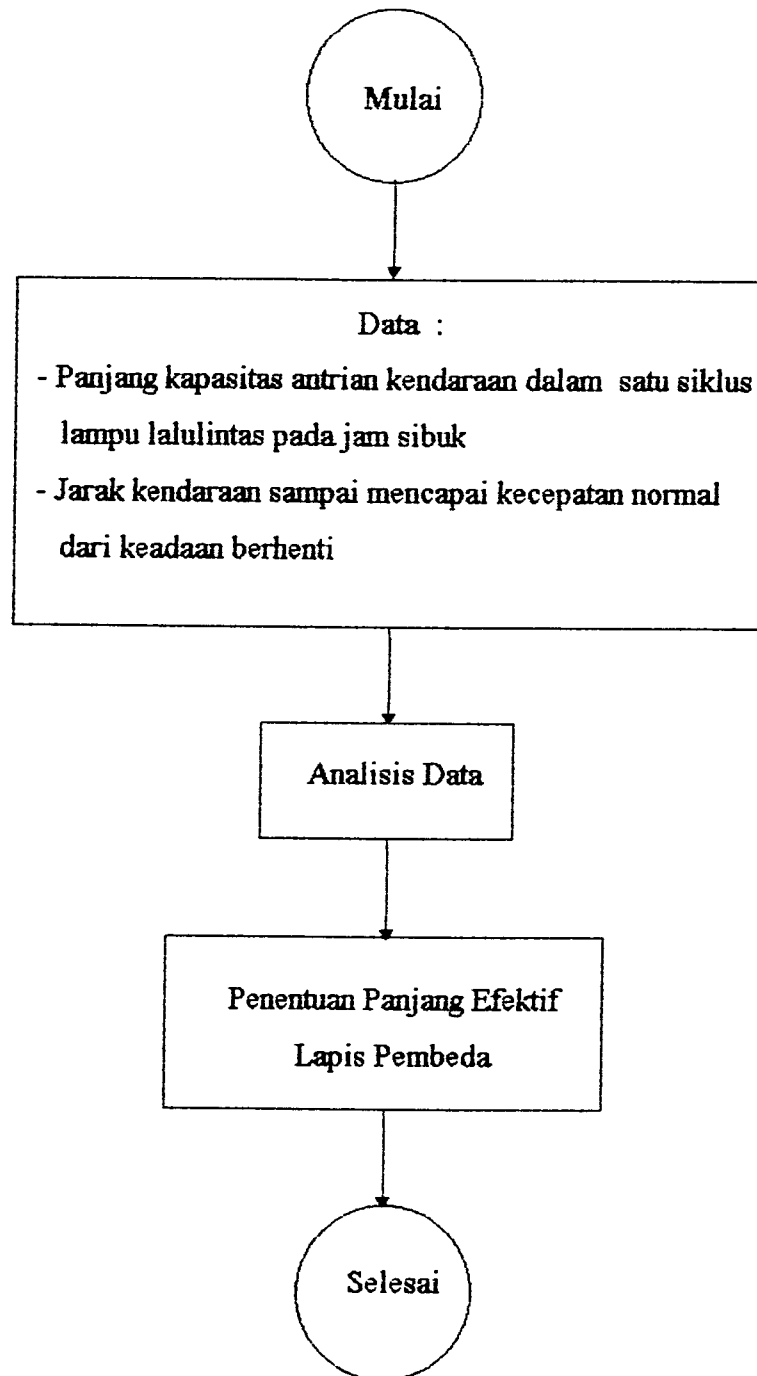
1. stop watch, digunakan untuk mengukur data waktu (waktu merah, waktu hijau, waktu kuning dan waktu keterlambatan kendaraan dalam bergerak),
2. meteran pita, digunakan untuk mengukur data panjang antrian kendaraan yang lolos pada waktu hijau saat arus jenuh dan panjang akselerasi kendaraan untuk mencapai kecepatan normal dari keadaan berhenti,
3. termometer, digunakan untuk mengukur data temperatur perkerasan, dan
4. sepeda motor. digunakan untuk menentukan kecepatan kendaraan.

3.3 Analisis Data

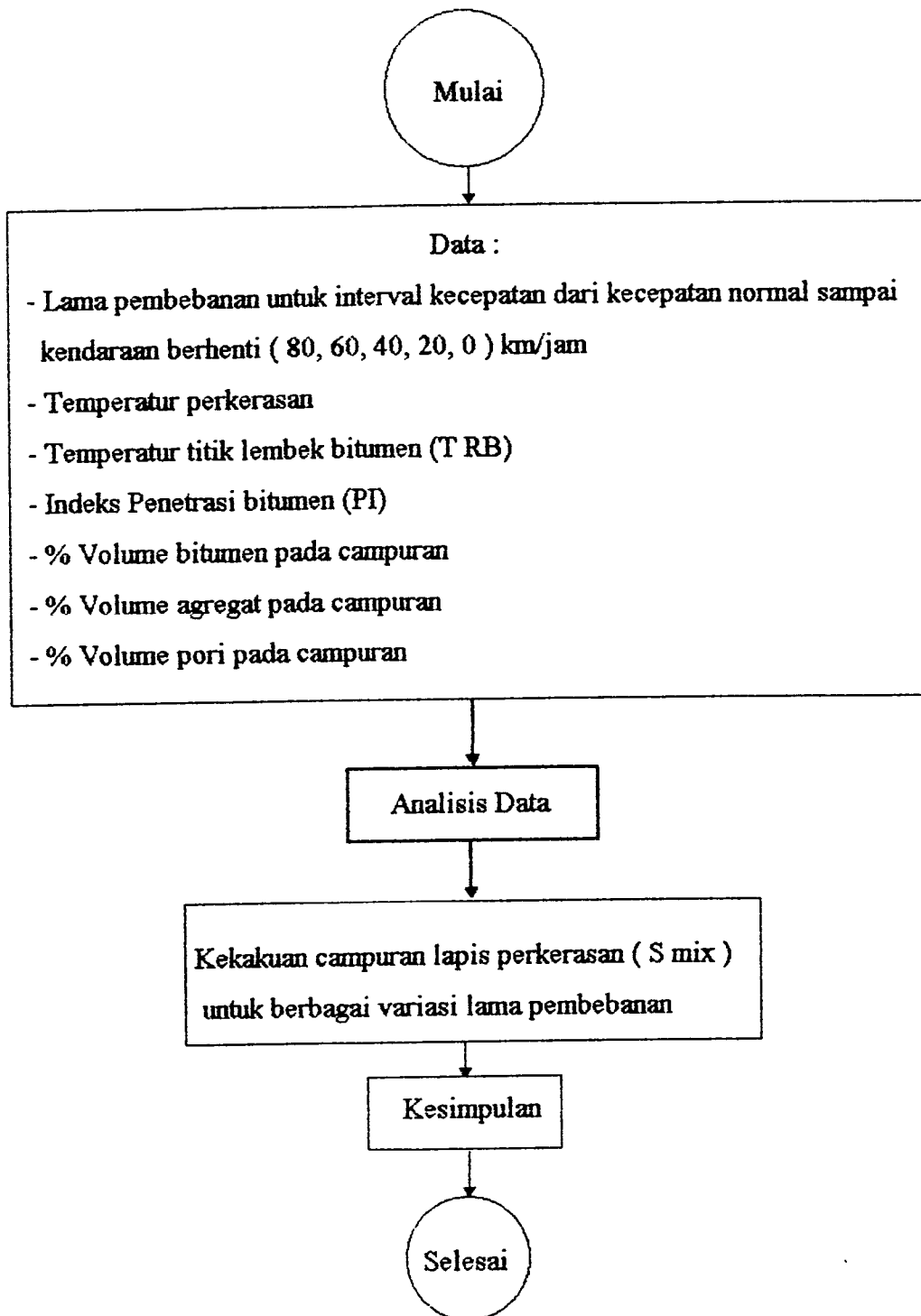
Analisis data dilakukan setelah data yang dikumpulkan didapat semua. Data tersebut dianalisis dengan cara perhitungan matematis menggunakan formula yang ada untuk menentukan kekakuan dan tebal lapis perkerasan pembeda.



Gambar 3.1 Bagan alir pelaksanaan penelitian



Gambar 3.2 Bagan alir penentuan panjang lapis pembeda



Gambar 3.3 Diagram alir penentuan tebal lapis pembeda

BAB IV

HASIL PENELITIAN DAN PEMBAHASAN

4.1 Panjang Efektif Lapis Pembeda

Panjang efektif lapis pembeda meliputi panjang antrian kendaraan yang lolos pada waktu hijau dalam kondisi antrian jenuh dan panjang yang diperlukan kendaraan untuk mencapai kecepatan normal (± 50 km/jam) dari keadaan berhenti. Panjang efektif lapis pembeda ini diukur langsung di lokasi simpang empat jalan arteri lingkaran utara (gambar 4.1 dan lampiran 14) dengan membagi ruas jalan dalam pias 5 meter untuk memudahkan pengamatan. Hasil selengkapnya tertera pada tabel berikut ini.

Tabel 4.1 Panjang Efektif Persimpangan Gejayan

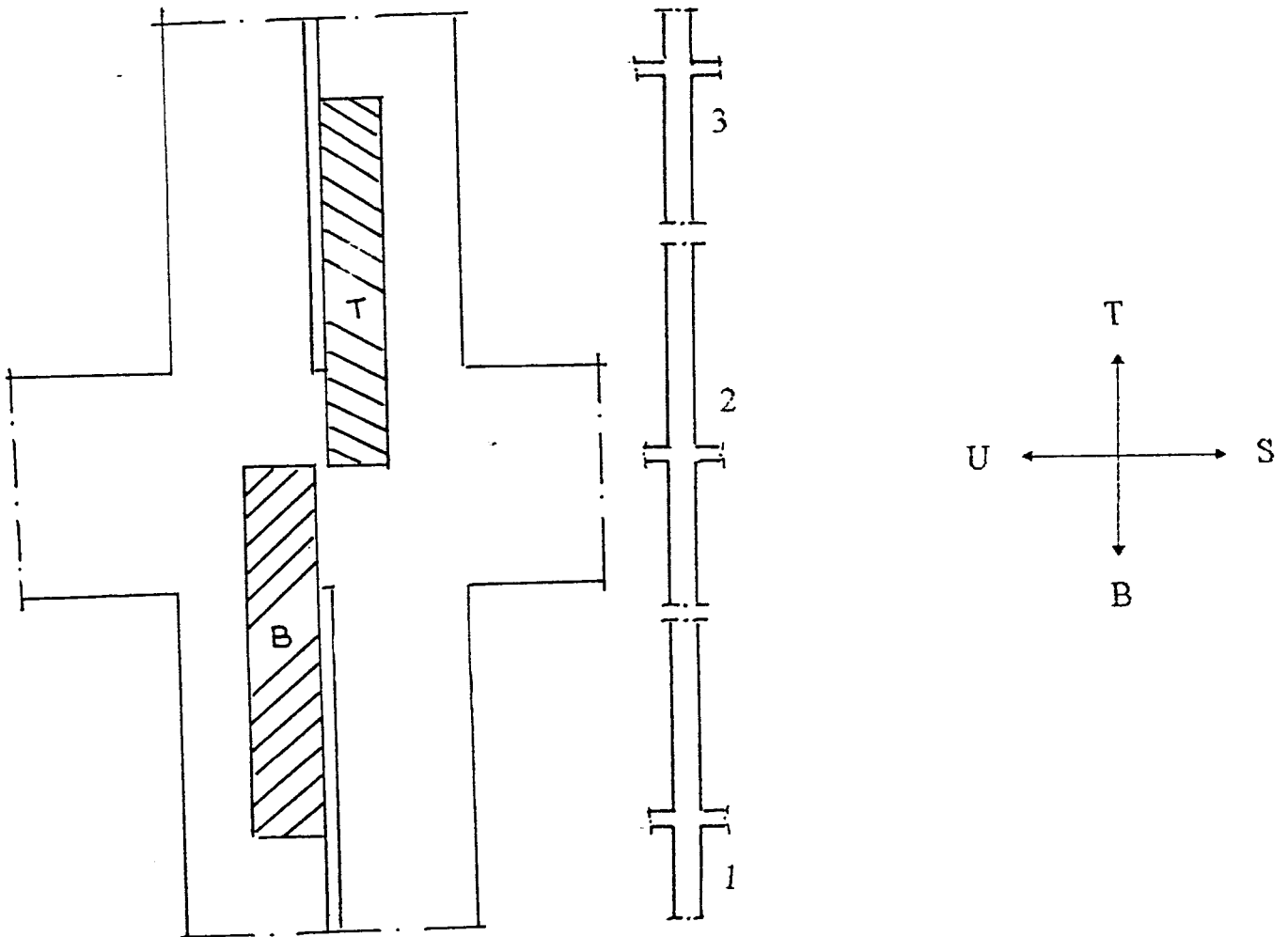
Data	Timur	Barat
Periode hijau	26"	26"
Periode merah	1' 40"	1' 40"
Periode kuning	3"	3"
Panjang antrian lolos	55 M	55 M
Panjang percepatan :		
- mobil penumpang	15 M	15 M
- bis/truk	25 M	25 M
- rata-rata	20 M	20 M
Panjang efektif total	75 M	75 M

Tabel 4.2 Panjang Efektif Persimpangan Kaliurang ✓

Data	Timur	Barat
Periode hijau	20"	20"
Periode merah	1' 45"	1' 45"
Periode kuning	3"	3"
Panjang antrian lolos	50 M	50 M
Panjang percepatan :		
- mobil penumpang	15 M	15 M
- bis/truk	25 M	25 M
- rata-rata	20 M	20 M
Panjang efektif total	70 M	70 M

Tabel 4.3 Panjang Efektif Persimpangan Monjali ✓

Data	Timur	Barat
Periode hijau	20"	20"
Periode merah	1' 15"	1' 15"
Periode kuning	3"	3"
Panjang antrian lolos	50 M	50 M
Panjang percepatan :		
- mobil penumpang	15 M	15 M
- bis/truk	25 M	25 M
- rata-rata	20 M	20 M
Panjang efektif total	70 M	70 M



Keterangan :

- T = Panjang Efektif Sisi Timur
- B = Panjang Efektif Sisi Barat
- 1 = Persimpangan Monjali
- 2 = Persimpangan Jl. Kaliurang
- 3 = Persimpangan Jl. Gejayan

Gambar 4.1 Gambar tanpa skala lokasi penelitian

4.2 Perhitungan Kekakuan Bitumen (S bit)

Untuk mendapatkan kekakuan lapis perkerasan, terlebih dahulu dihitung kekakuan bitumennya. Data-data yang didapat adalah sebagai berikut ini.

1. Panjang bidang kontak roda kendaraan = 20 Cm
2. Temperatur perkerasan = 46°C
3. Temperatur titik lembek aspal (T RB) = 53°C
4. Penetrasi aspal = 70

Dengan data tersebut diatas dapat dihitung lama pembebanan, selisih temperatur, dan indeks penetrasi aspal. Selanjutnya kekakuan bitumen ditentukan dari pembacaan nomogram Shell.

Pehitungan selisih temperatur, indeks penetrasi aspal, dan lama pembebanan adalah sebagai berikut ini.

a. Selisih temperatur (T)

$$T = T_{RB} - T_{perkerasan}$$

$$T = 53 - 46$$

$$= 7^{\circ}C$$

b. Indeks penetrasi aspal (PI)

Temperatur titik lembek aspal diasumsikan terjadi pada penetrasi 800, karena pada penetrasi 800 tersebut aspal dalam keadaan lembek/awal cair. Indeks penetrasi aspal dapat dihitung seperti berikut ini.

$$A = \frac{\text{Log pen 2} - \text{Log pen 1}}{T2 - T1}$$

$$PI = \frac{20 - 500 (A)}{1 + 50 (A)}$$

dengan :

penetrasi 1 = penetrasi 70

penetrasi 2 = penetrasi 800

T1 = 53°C

T2 = 25°C

maka indeks penetrasi asphal adalah :

$$A = \frac{\text{Log 70} - \text{Log 800}}{25 - 53} = 0,04$$

$$PI = \frac{20 - 500 (0,04)}{1 + 50 (0,04)} = 0$$

Hasil ini menunjukkan bahwa aspal penetrasi 70 tersebut bersifat moderat (tidak begitu peka terhadap perubahan temperatur).

c. Lama Pembebanan

Lama pembebanan berdasarkan kecepatan terlihat pada tabel 4.4 berikut.

Tabel 4.4 Lama pembebanan berdasarkan kecepatan

Kecepatan V (km/jam)	Bidang kontak roda L (cm)	Lama Pembebanan $t = L / V$ (detik)
80	20	0,009
60	20	0,012
40	20	0,018
20	20	0,036

Lama pembebanan berdasarkan waktu hilang adalah sebagai berikut :

- lama periode merah (diambil yang terlama pada jl. kaliurang) = 1 menit 45 detik
= 105 detik
- lama keterlambatan kendaraan dalam bergerak = 5 detik
- lama pembebanan berdasarkan waktu hilang seluruhnya = 105 + 5 = 110 detik

Selanjutnya kekakuan bitumen berdasarkan variasi perubahan lama pembebanan didapat dari pembacaan nomogram Shell (lampiran1), dimana hasilnya seperti tertera pada tabel 4.5.

Tabel 4.5 Kekakuan Bitumen (Sbit)

Lama Pembebanan (detik)	Indeks Penetrasi (PI)	Selisih Temperatur (° C)	Kekakuan Bitumen (Sbit) (10 ² N/m ²)
0,009	0	7	7000
0,012	0	7	6600
0,018	0	7	6000
0.036	0	7	5000
110	0	7	3

4.3 Kekakuan Campuran Perkerasan (S mix)

Pekerjaan lapis tambahan (“overlay”) terakhir pada jalan arteri lingkaran utara bagian timur Yogyakarta dilakukan oleh Bina Marga melalui Bagian Proyek Rehabilitasi/Pemeliharaan Jalan Nasional Seksi Sleman pada tahun 1995. Pekerjaan lapis tambahan itu berupa lapis SMA (“Split Mastic Asphalt”).

Data-data yang didapat dari Bina Marga untuk menghitung kekakuan campuran SMA tersebut adalah sebagai berikut ini.

1. Persentase berat aspal dalam campuran = 6,8 %
2. Persentase Void (rongga) = 4 %
3. B_j aspal = 1,0405 gr/cc
4. Berat campuran benda uji = 1257,6 gr
5. Volume campuran benda uji = 536,52 cc

Pada data tersebut persentase aspal berupa persentase berat, maka harus diubah dahulu ke dalam persentase volume. Caranya adalah sebagai berikut ini.

- a. Berat aspal dalam campuran = % berat aspal x berat campuran
= 6,8 % x 1257,6
= 85,52 gr.
- b. Volume aspal dalam campuran = berat aspal : Bj aspal
= 85,52 : 1,0405
= 82,19 cc
- c. Persentase volume aspal dalam campuran = (vol. aspal : vol. camp.) x 100 %
= (82,19 : 536,52) x 100 %
= 15,32 %
- d. Persentase volume agregat dalam campuran = 100 % - % aspal - % rongga
= 100 % - 15,32 % - 4 %
= 80,68 %

Selanjutnya untuk menentukan kekakuan campuran digunakan dua cara sebagai perbandingan, yaitu cara analitis dan cara grafis.

4.3.1 Perhitungan S mix dengan Cara Analitis

Persamaan yang digunakan untuk menghitung kekakuan campuran perkerasan dengan cara analitis adalah seperti berikut ini (SHELL,1978).

$$S_{mix} = S_{bit} \left[1 + \frac{2,5}{n} \times \frac{C_v}{1 - C_v} \right]^n$$

$$n = 0,83 \text{Log} \left[\frac{4 \times 10^{10}}{S_{bit}} \right]$$

$$C_v = \frac{\text{volume agregat}}{\text{vol. agregat} + \text{vol. bitumen}} = \frac{V_g}{V_g + V_b}$$

keterangan :

C_v = konsentrasi volume (%)

S_{mix} = kekakuan perkerasan (N/m^2) atau Pa

S_{bit} = kekakuan bitumen (N/m^2) atau Pa

Persamaan di atas valid untuk % voids ≤ 3 %, bila % voids > 3 % formula di atas di modifikasi menjadi sebagai berikut :

$$C_v' = \frac{C_v}{1 + (V_v - 0,03)}$$

V_v = % voids (dalam desimal)

Persamaan ini dapat digunakan jika memenuhi syarat sebagai berikut :

$$C_b \geq 2/3 (1 - C_v')$$

$$C_b = \frac{\text{volume bitumen}}{\text{vol. agregat} + \text{vol. bitumen}}$$

C_b = konsentrasi bitumen

Karena dari data diketahui bahwa % void (rongga) = 4 % berarti lebih besar dari 3%, maka terlebih dahulu dilakukan kontrol apakah persamaan tersebut memenuhi syarat untuk digunakan.

$$C_v = \frac{80,68}{80,68 + 15,32} = 0,84$$

$$C_v' = \frac{0,84}{1 + (0,04 - 0,03)} = 0,83$$

$$C_b = \frac{15,32}{80,68 + 15,32} = 0,16$$

$$\frac{2}{3} (1 - C_v') = 0,11$$

ternyata $C_b > \frac{2}{3} (1 - C_v')$, berarti kekakuan campuran perkerasan dapat dihitung dengan persamaan yang ada.

Berikut ini adalah perhitungan kekakuan campuran perkerasan dengan cara analitis pada masing-masing lama pembebanan.

1. Lama pembebanan 0,009 detik dengan S bit = 7×10^5 N/m²

$$n = 0,83 \text{Log} \left[\frac{4 \times 10^{10}}{7 \times 10^5} \right]$$

$$= 3,95$$

$$S_{mix} = 7 \times 10^5 \left[1 + \frac{2,5}{3,95} \times \frac{0,83}{1 - 0,83} \right]^{3,95}$$

$$= 1,8 \times 10^8 \text{ N/m}^2$$

2. Lama pembebanan 0,012 detik dengan S bit = $6,6 \times 10^5$ N/m²

$$n = 0,83 \text{Log} \left[\frac{4 \times 10^{10}}{6,6 \times 10^5} \right]$$

$$= 3,97$$

$$S_{mix} = 6,6 \times 10^5 \left[1 + \frac{2,5}{3,97} \times \frac{0,83}{1 - 0,83} \right]^{3,97}$$

$$= 1,7 \times 10^8 \text{ N/m}^2$$

3. Lama pembebanan 0,018 detik dengan $S_{bit} = 6 \times 10^5 \text{ N/m}^2$

$$n = 0,83 \text{Log} \left[\frac{4 \times 10^{10}}{6 \times 10^5} \right]$$

$$= 4,00$$

$$S_{mix} = 6,0 \times 10^5 \left[1 + \frac{2,5}{4,00} \times \frac{0,83}{1 - 0,83} \right]^{4,00}$$

$$= 1,6 \times 10^8 \text{ N/m}^2$$

4. Lama pembebanan 0,036 detik dengan $S_{bit} = 5 \times 10^5 \text{ N/m}^2$

$$n = 0,83 \text{Log} \left[\frac{4 \times 10^{10}}{5 \times 10^5} \right]$$

$$= 4,07$$

$$S_{mix} = 5 \times 10^5 \left[1 + \frac{2,5}{4,07} \times \frac{0,83}{1 - 0,83} \right]^{4,07}$$

$$= 1,4 \times 10^8 \text{ N/m}^2$$

5. Lama pembebanan 110 detik dengan $S_{bit} = 300 \text{ N/m}^2$

$$n = 0,83 \text{Log} \left[\frac{4 \times 10^{10}}{3 \times 10^2} \right]$$

$$= 6,74$$

$$S_{mix} = 3,0 \times 10^2 \left[1 + \frac{2,5}{6,74} \times \frac{0,83}{1 - 0,83} \right]^{6,74}$$

$$= 3,2 \times 10^5 \text{ N/m}^2$$

4.3.2 Perhitungan S_{mix} dengan Cara Grafis

Nilai kekakuan campuran (S_{mix}) dengan cara grafis didapat dengan menghubungkan garis-garis yang ada pada nomogram Shell (lampiran 2), yaitu dengan menghubungkan garis kekakuan butumen dengan garis persen volume bitumen yang kemudian akan berpotongan dengan garis persen volume agregat selanjutnya ditarik garis ke arah garis kekakuan campuran. Hasil lengkap pembacaan nomogram Shell kekakuan lapis perkerasan pada jalan arteri lingkaran utara Yogyakarta ini ditunjukkan pada tabel 4.6.

Tabel 4.6 Hasil S mix dengan cara grafis

Lama pembebanan (detik)	S bit ($\times 10^2 \text{ N/m}^2$)	% aspal (Vb)	% agregat (Vg)	S mix ($\times 10^9 \text{ N/m}^2$)
0,009	7000	15,32	80,68	1,0
0,012	6600	15,32	80,68	1,0
0,018	6000	15,32	80,68	1,0
0,036	5000	15,32	80,68	1,0
110	3	15,32	80,68	1,0

Hasil yang didapat menunjukkan kekakuan campuran perkerasan dengan cara grafis sama untuk semua kondisi lama pembebanan. Hal ini terjadi karena pada nomogram Shell yang dipergunakan nilai kekakuan aspal terendah $5 \times 10^6 \text{ N/m}^2$ sedangkan kekakuan aspal yang ada mempunyai nilai tertinggi $7 \times 10^5 \text{ N/m}^2$ sehingga hasil yang diperoleh tidak akurat. Pada perhitungan selanjutnya, digunakan nilai kekakuan campuran berdasarkan hitungan analitis.

4.4 Perhitungan Tebal Perkerasan

Perhitungan tebal perkerasan lapis pembeda dengan kekakuan yang berbeda dilakukan dengan perancangan tebal perkerasan metoda SHELL 1978.

4.4.1 Tanah Dasar

Dari keterangan Bina Marga diketahui bahwa tanah dasar tempat struktur perkerasan berada mempunyai nilai CBR 10 %, maka dengan pembacaan pada grafik korelasi modulus dinamik (E_3) tanah dasar didapat nilai $E_3 = 10^8 \text{ N/m}^2$

4.4.2 Lalu Lintas

Data lalu lintas pada jalan arteri lingkar utara Yogyakarta adalah sebagai berikut :

1. kendaraan ringan 2 ton (1 ton asdepan tunggal +1 ton as belakang tunggal)
= 3577 kendaraan
2. bus 8 ton (3 ton as depan tunggal + 5 ton as belakang tunggal)
= 215 kendaraan
3. truck 2 as 13 ton (5 ton as depan tunggal + 8 ton as belakang tunggal)
= 389 kendaraan
4. truck 3 as 20 ton (7,7 ton as depan tunggal + 12,3 ton as belakang ganda)
= 118 kendaraan

Jumlah kumulatif beban gandar standar seperti terlihat pada tabel 4.7 berikut ini.

Tabel 4.7 Jumlah Beban Gandar Standar

Beban gandar Ton (1)	Beban gandar kN (2)	Jumlah gandar / lajur / hari (3)	Faktor konversi (4)	Jumlah gandar / lajur / hari (5) = (3) x (4)
1	9,8	3577	0,0002	0,7154
3	29,4	107,5	0,0179	1,9243
5	49	302	0,1384	41,7968
7,7	75,5	59	0,5315	31,3585
8	78,4	194,5	0,9067	176,3532
12,3	120,5	59	5,0735	299,3365
TOTAL				551,4847

Dihitung total jumlah gandar/lajur/tahun yaitu :

$$N = 551,4847 \times 365$$

$$= 2,01 \times 10^5 \text{ kendaraan / lajur/ tahun}$$

4.4.3 Material Berbutir

Bahan untuk material berbutir ini adalah batu pecah dengan CBR 80% (Bina Marga) dari grafik korelasi didapat $E_2 = 8 \times 10^8 \text{ N/m}^2$

4.4.4 Lapis Permukaan Beraspal

Komposisi campuran lapis permukaan beraspal adalah sebagai berikut :

1. Persen volume agregat, $V_a = 80,68\%$
2. Persen volume bitumen, $V_b = 15,32\%$
3. Persen volume void, $V_v = 4\%$

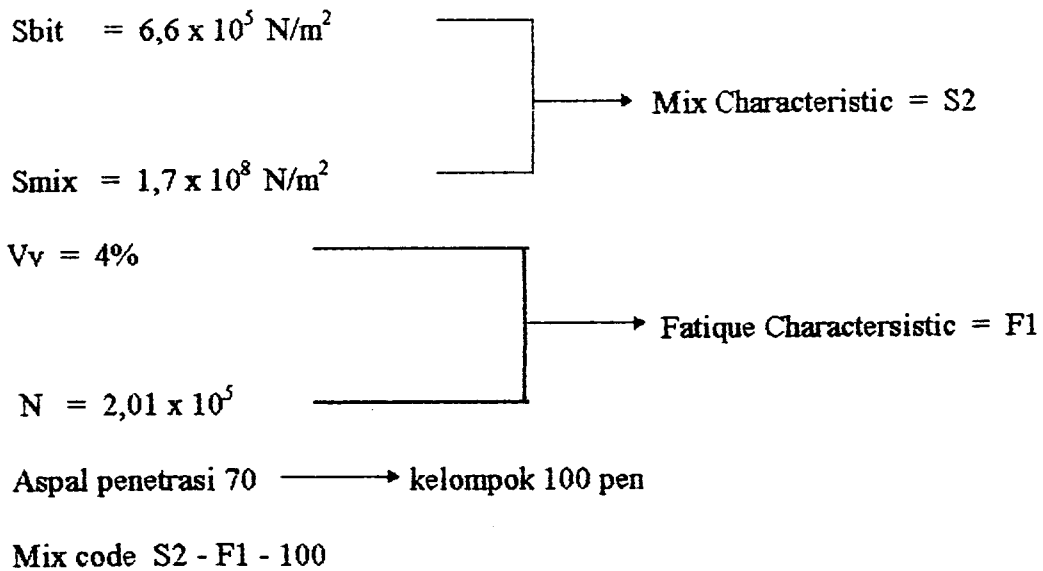
4.4.5 Faktor Regional

Suhu rata-rata bulanan (w-MAAT) di Yogyakarta adalah 28°C (suhu harian berkisar antara 24°C - 32°C).

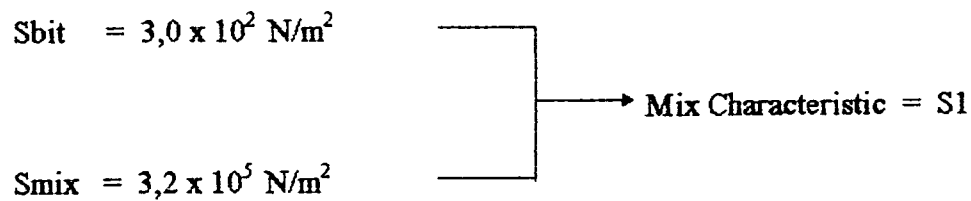
6.4.6 Mix Code

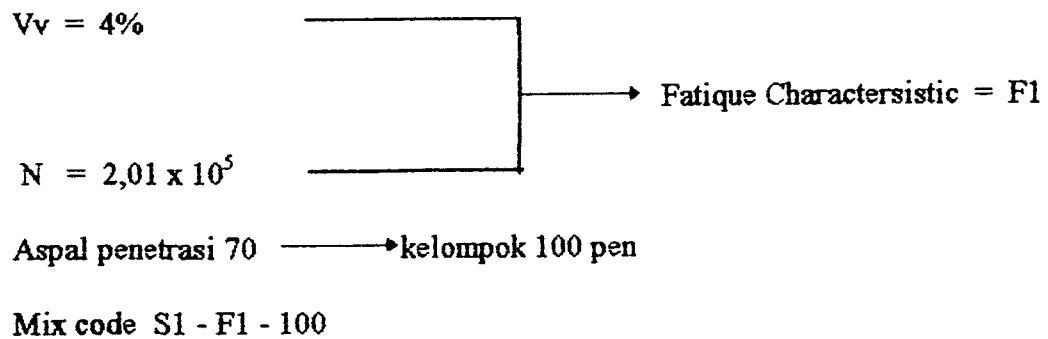
Mix code untuk menentukan tebal perkerasan dibedakan atas mix code untuk lama pembebanan 0,012 detik dan mix code untuk lama pembebanan 110 detik.

1. Mix code lama pembebanan 0,012 detik



2. Mix code lama pembebanan 110 detik





4.4.7 Tebal Perkerasan

Tebal perkerasan untuk masing-masing mix code didapat dari grafik pada lampiran 9 yang dibuat menurut kriteria fatigue pada lapisan aspal berdasarkan tegangan yang diijinkan sebagai fungsi dari repetisi beban dan modulus campuran (lihat lampiran 15-21 tentang fatigue).

1. mix code S1 - F1 - 100

tebal lapis pondasi (h2) = 30 cm

tebal lapis aspal (h1) = 15 cm

2. mix code S2 - F1 - 100

tebal lapis pondasi (h2) = 30 cm

tebal lapis aspal (h1) = 6 cm

4.5 Pembahasan

4.5.1 Panjang Efektif Lapis Pembeda

Dari hasil pengamatan dan pengukuran langsung di lapangan, ternyata panjang efektif lapis pembeda di simpang empat Gejayan yang terpanjang yaitu 75 meter sedangkan pada simpang empat jalan Kaliurang dan Monumen Yogya Kembali panjangnya sama yaitu 70 meter. Perbedaan panjang efektif ini terletak pada panjang antrian kendaraan yang lolos. Hal ini terjadi karena panjang antrian tersebut dipengaruhi oleh lama periode hijau pada tiap simpang tersebut, dimana periode hijau pada tiap simpang ini satu sama lain belum tentu sama. Sedangkan panjang percepatan kendaraan untuk mencapai kecepatan normal pada dasarnya untuk semua simpang sama. Panjang ini hanya dipengaruhi faktor jenis kendaraan, kemampuan pengemudi, dan kondisi jalan dimana faktor-faktor tersebut untuk setiap simpang relatif sama sehingga didapat hasil yang sama pula.

4.5.2 Lapis Pembeda

Dari hasil perhitungan didapat bahwa untuk lama pembebanan yang berbeda dibutuhkan tebal perkerasan yang berbeda pula. Pada penelitian ini sebagai pembanding adalah tebal lapis aspalnya, dengan tebal lapis pondasi yang sama. Tebal lapis campuran aspal pada lama pembebanan 110 detik = 15 cm lebih tebal dari lama pembebanan 0,012 detik = 6 cm.

BAB V

KESIMPULAN DAN SARAN

5.1. Kesimpulan

Berdasarkan hasil penelitian dan data-data yang didapat maka dapat disimpulkan sebagai berikut.

1. Panjang efektif lapis pembeda pada persimpangan berlampu lalu lintas pada jalan arteri lingkaran utara Yogyakarta berkisar antara 70 meter sampai 75 meter.
2. Semakin rendah nilai kekakuan perkerasan maka semakin tebal perkerasannya. Hal ini terlihat pada lama pembebanan rata-rata 110 detik dengan $S_{mix} = 3,2 \times 10^5 \text{ N/m}^2$ didapat tebal perkerasan = 15 cm sedangkan pada lama pembebanan 0,012 detik ($V = 60 \text{ Km/jam}$) dengan $S_{mix} = 1,7 \times 10^8 \text{ N/m}^2$ didapat tebal perkerasan = 6 cm.

5.2 Saran

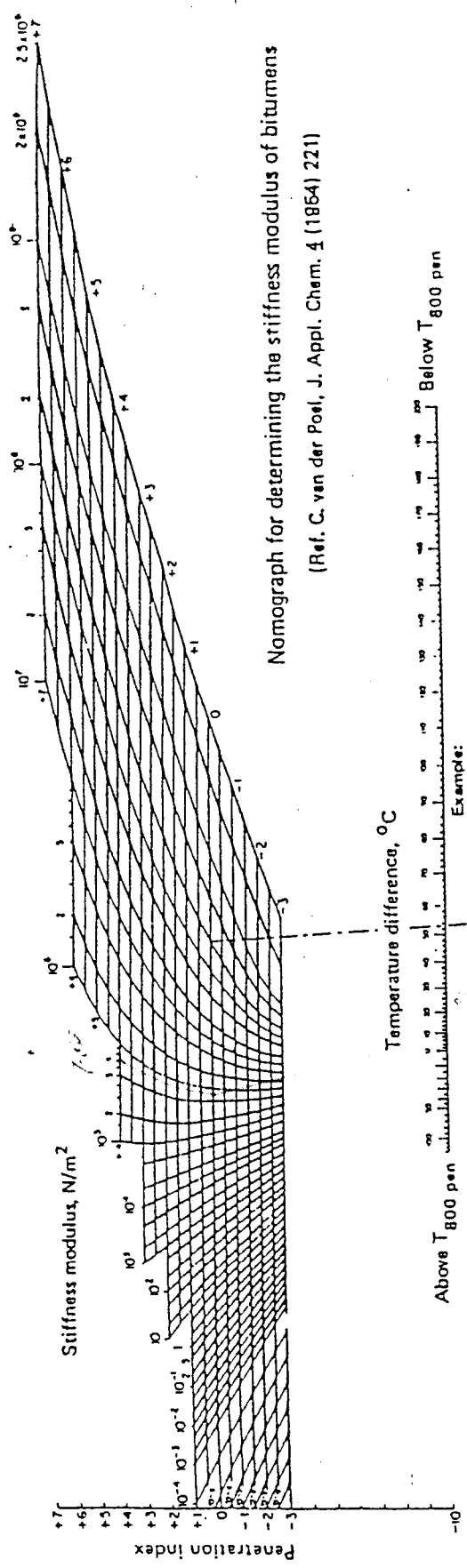
Melihat hasil kesimpulan tersebut, diajukan saran sebagai berikut ini.

1. Guna mendapatkan struktur lapis perkerasan yang baik maka diperlukan mutu dan komposisi bahan yang baik sesuai dengan kondisinya.
2. Perlu adanya penelitian lebih lanjut jika untuk panjang efektif tersebut digunakan perkerasan kaku atau komposit, baik ditinjau dari segi teknis maupun ekonomisnya.

3. Perlu diatur seefektif mungkin siklus lampu lalu lintas agar kendaraan tidak terlalu lama berhenti dan antrian yang terjadi tidak terlalu panjang.

DAFTAR PUSTAKA

1. Clarkson H. Oglesby & R. Gary Hicks, 1990, Teknik Jalan Raya, Penerbit Erlangga.
2. Hobbs, 1995, Perencanaan dan teknik Lalu Lintas, Gadjah Mada University Press Yogyakarta.
3. Robert N. Hunter, 1994, Bituminous Mixture, Published by Thomas Telford Services Ltd.
4. Sukirman, Silvia, 1992, Perkerasan Lentur Jalan Raya, Penerbit Nova Bandung.
5. _____, 1978, SHELL Pavement Design Manual, Published by SHELL Petroleum Co.



Nomograph for determining the stiffness modulus of bitumens
(Ref. C. van der Post, J. Appl. Chem. 4 (1954) 221)

The stiffness modulus, defined as the ratio σ/ϵ = stress/strain, is a function of time of loading (frequency), temperature difference with T_{800} pen' and PI. T_{800} pen is the temperature at which the penetration would be 800. This is obtained by extrapolating the experimental log penetration versus temperature line to the penetration value 800. At low temperatures and/or high frequencies the stiffness modulus of all bitumens asymptotes to a limit of approx. 3×10^9 N/m².

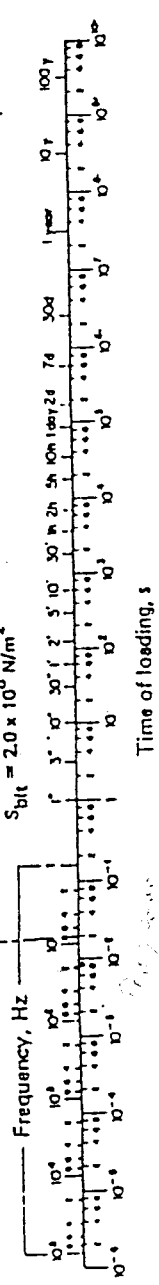
Units:
 $1 \text{ N/m}^2 = 10 \text{ dyn/cm}^2 = 1.02 \times 10^{-5} \text{ kgf/cm}^2 = 1.45 \times 10^{-4} \text{ lb/sq. in.}$
 $1 \text{ N/m}^2 = 10 \text{ P}$

Example:
 Operating conditions
 Temperature : 11 °C
 Loading time : 0.02 seconds

Characteristics of the bitumen in the mix
 T_{800} pen temperature at which the penetration is 800 0.1 mm : 64 °C
 PI, penetration index : 0
 Connect 0.02 s on time scale with temperature difference 64 - 11 °C on temperature scale.
 Record stiffness on grid at PI = 0

The stiffness of the bitumen determined with this nomograph is

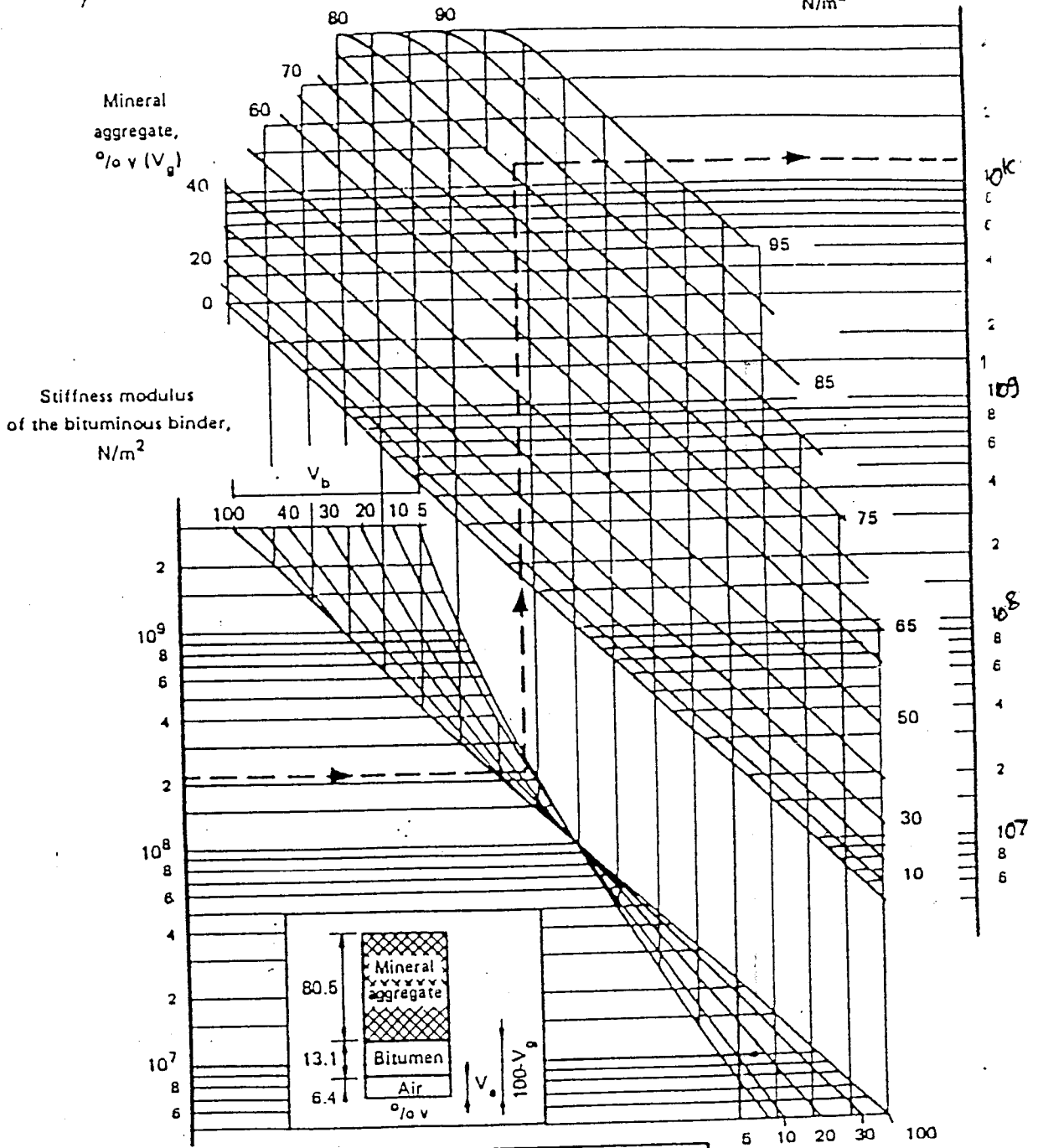
$S_{bit} = 2.0 \times 10^8 \text{ N/m}^2$



Time of loading, s

LAMPIRAN 2

Stiffness modulus
of the bituminous mix,
 N/m^2

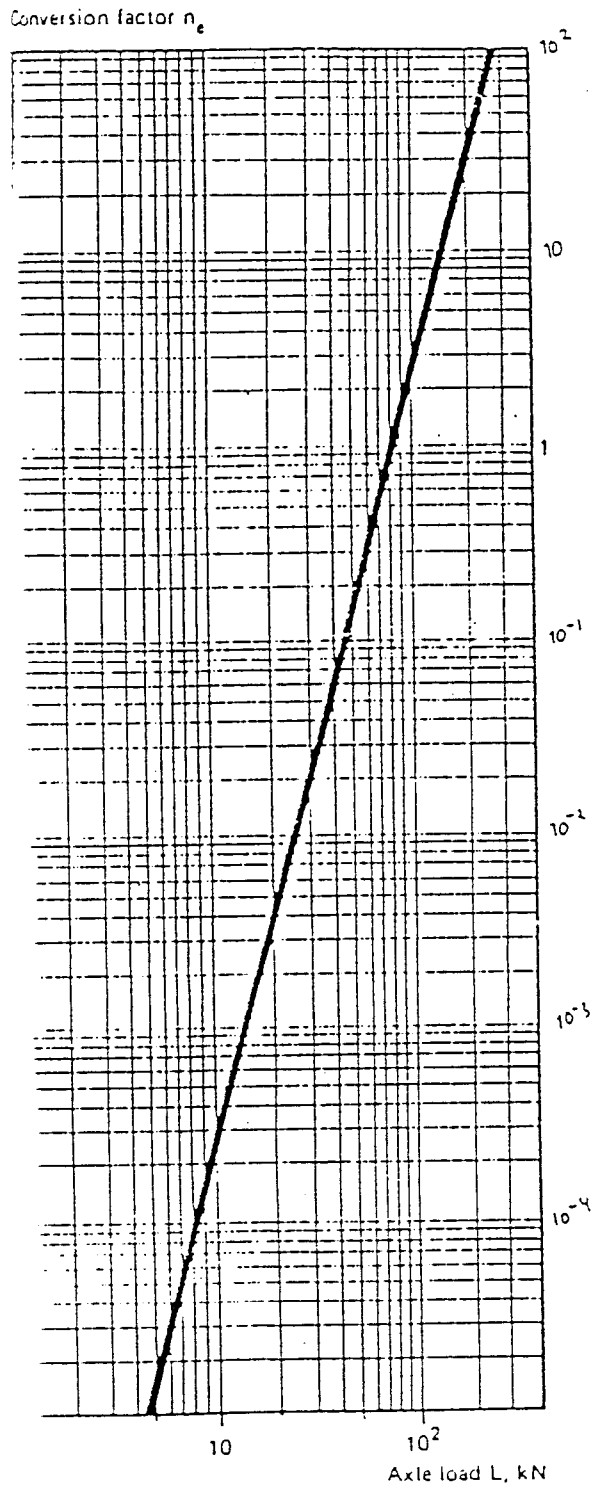


e.g. Stiffness modulus of the recovered binder $2 \times 10^8 N/m^2$	Stiffness modulus of the mix $1.1 \times 10^{10} N/m^2$
Volume of binder V_b 13.1%	
Volume of mineral aggregate V_g 80.5%	

Bituminous binder, % v (V_b)

Nomograph for mix stiffness





Axle load L, kN	Conversion factor n_e
5	0.000015
9	0.000157
10	0.000240
20	0.00384
27	0.0127
30	0.019
40	0.061
44	0.090
50	0.15
60	0.31
62	0.35
70	0.58
80	1.00
90	1.57
100	2.40
110	3.51
120	4.98
130	6.85
140	9.22
150	12.15
160	15.73
170	20.05
180	25.19
190	31.28
200	38.40

$$n_e = 2.4 \times 10^{-8} \times L^4$$

CHART L

Axle load conversion

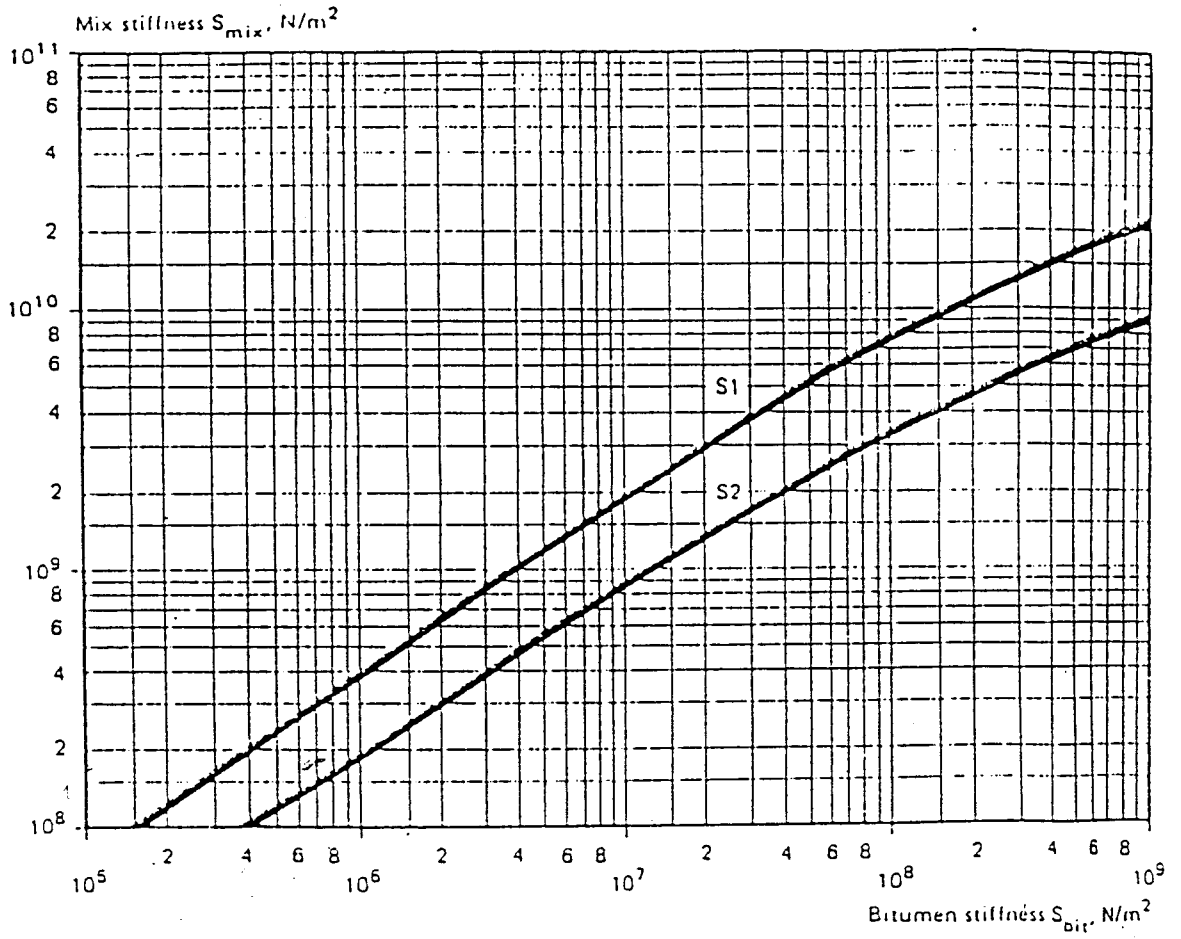


CHART M-1

Characteristic relationships between mix stiffness and bitumen stiffness

Mix stiffness S_{mix} (ϵ_1) N/m^2

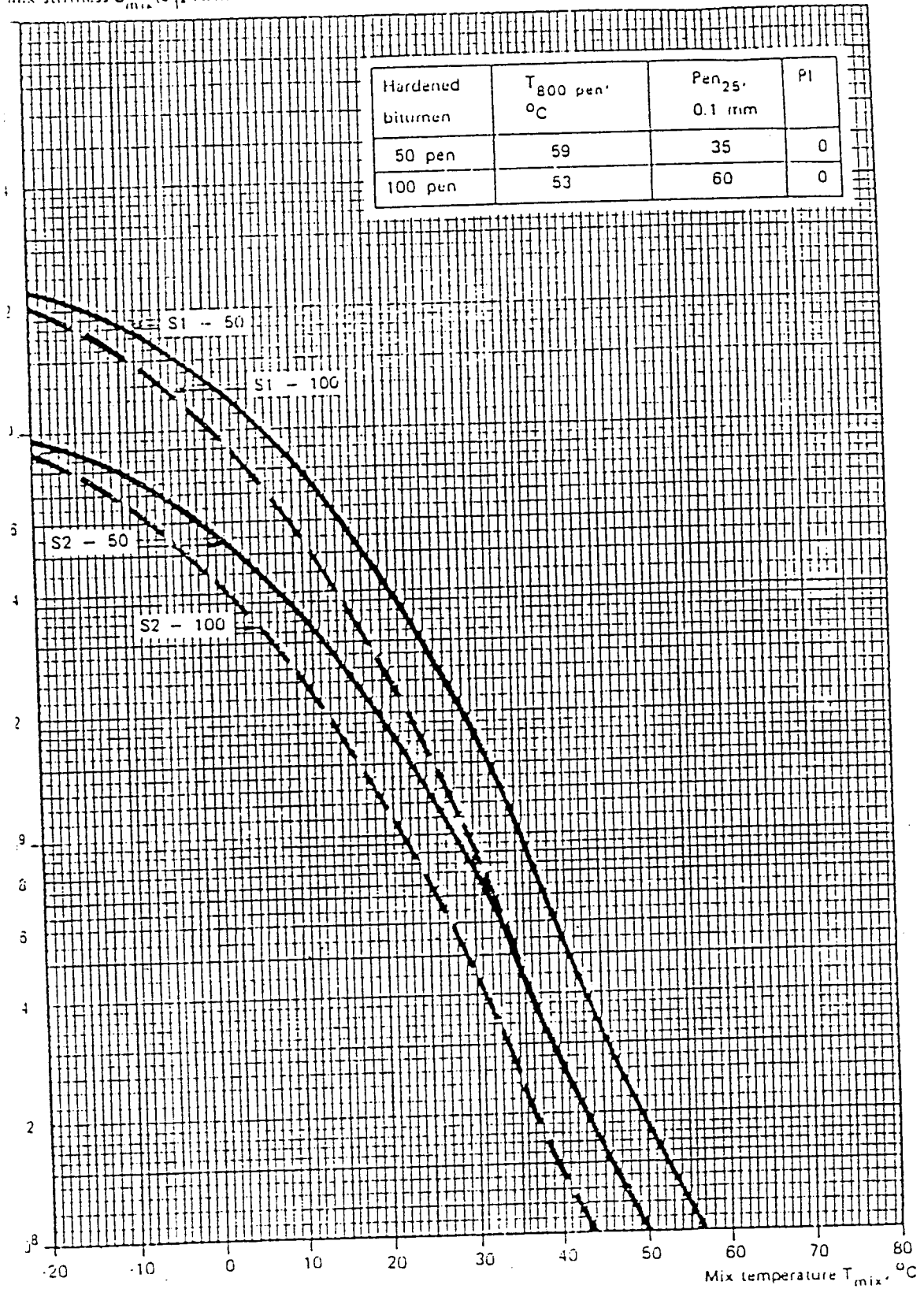


CHART M-2

Characteristic relationships between mix stiffness and mix temperature

Loading time 0.02 s

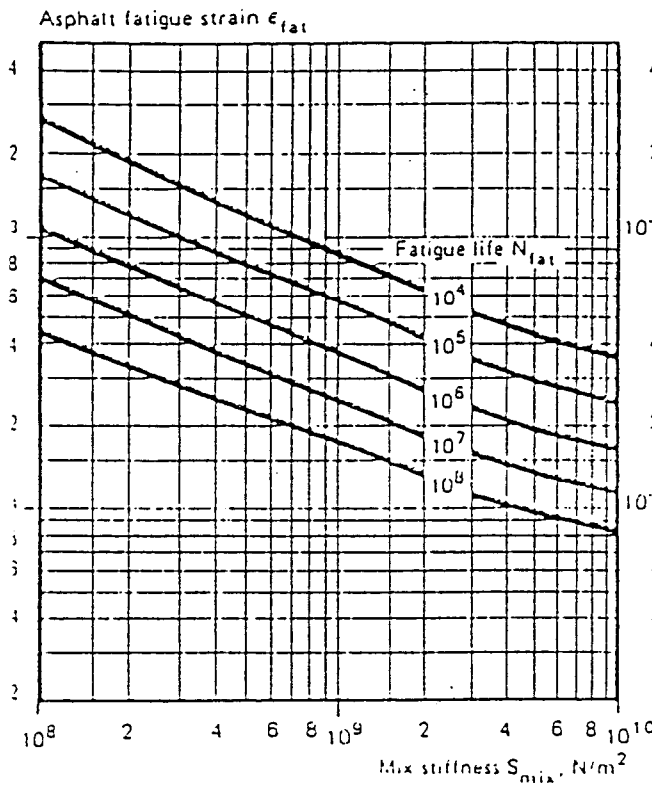


CHART M-3

Asphalt fatigue characteristics F1

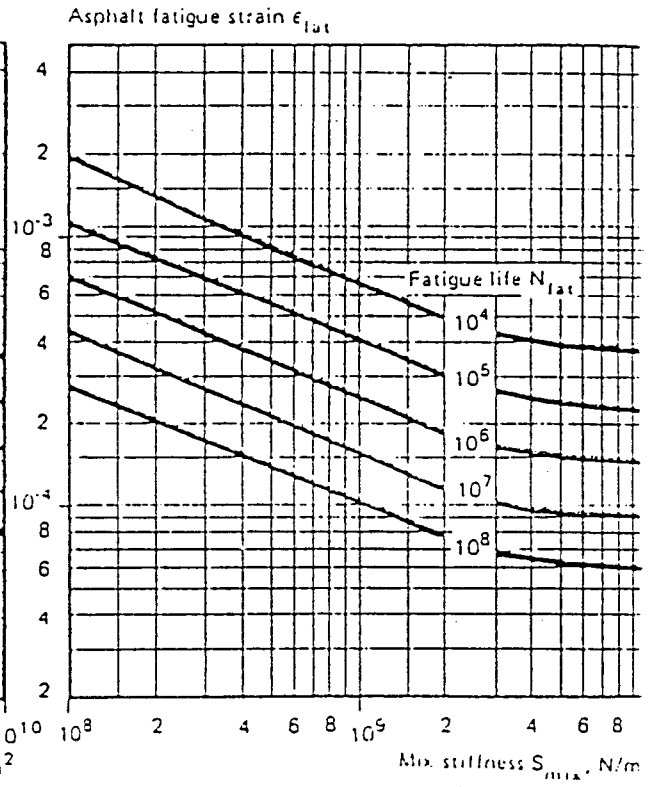


CHART M-4

Asphalt fatigue characteristics F2

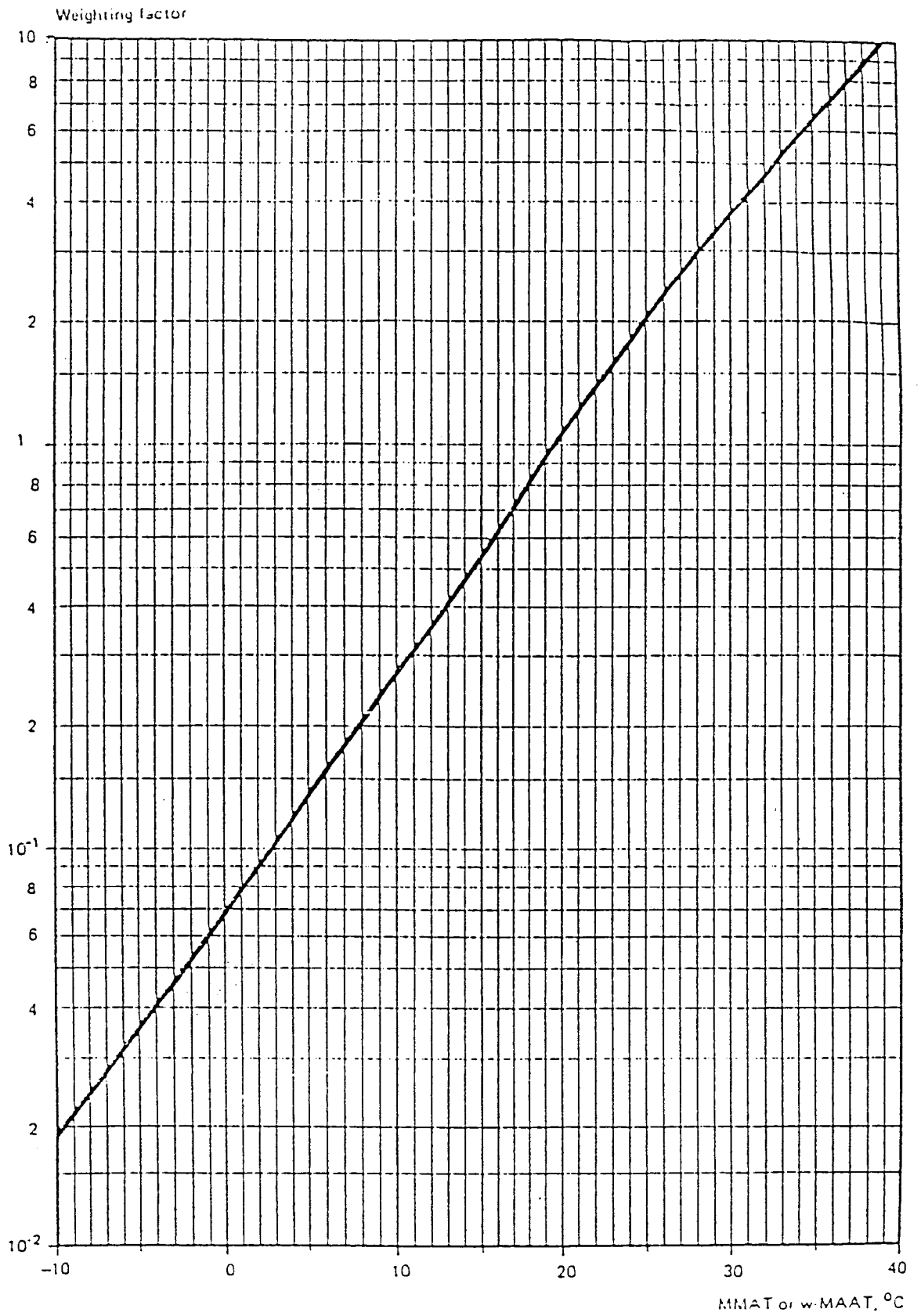
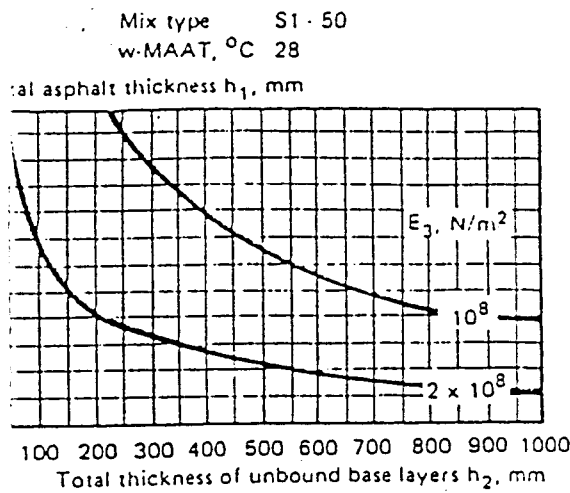
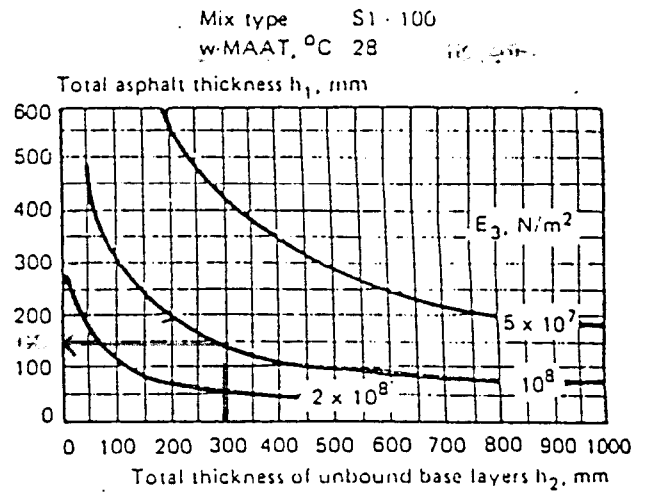


CHART W

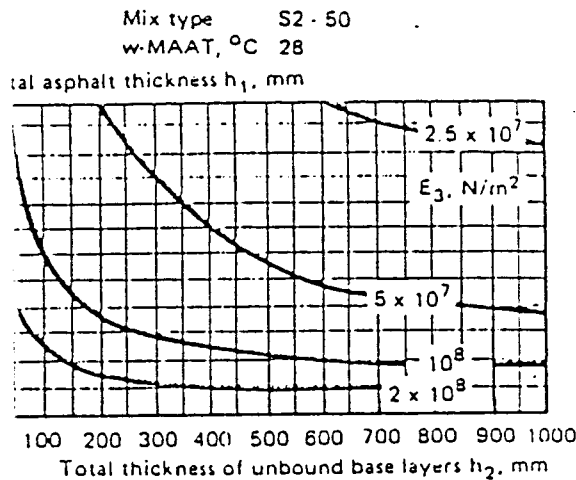
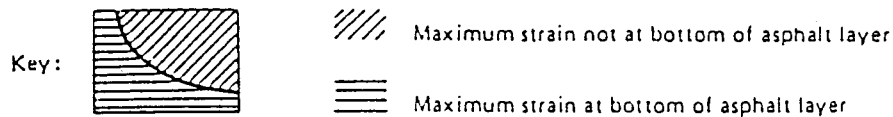
Temperature weighting curve



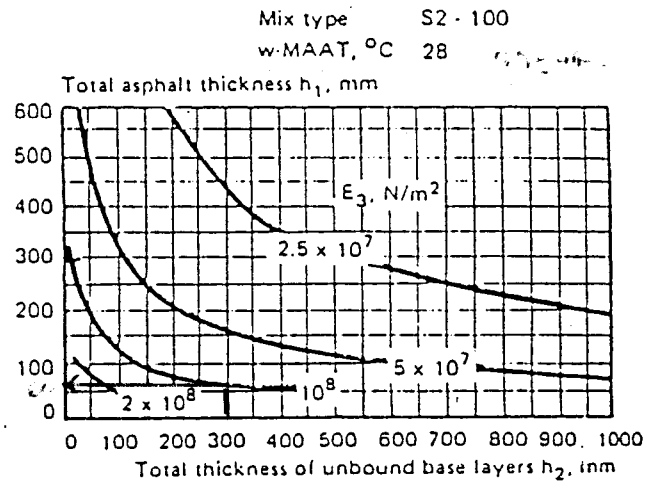
A3.6



A3.7



A3.8



A3.9

A3.6

Depth of maximum asphalt strain

Appendix 4 p test

General

Permanent deformation of asphalt mixes is dependent on a number of external and inherent variables. The external variables are the overall stress conditions and temperature; the main inherent variable is the mix composition. The aim of laboratory testing is to determine mix properties in quantities independent of the external variables. For permanent deformation characteristics the relevant quantity is the stiffness modulus of the mix (S_{mix}) which can be represented as a function of the stiffness modulus of the bitumen. S_{mix} is defined as:

$$S_{mix} = \frac{\sigma}{\epsilon_{mix}}$$

where:

σ = stress applied

$$\epsilon_{mix} = \text{strain measured} = \frac{\Delta h}{h_0}$$

where:

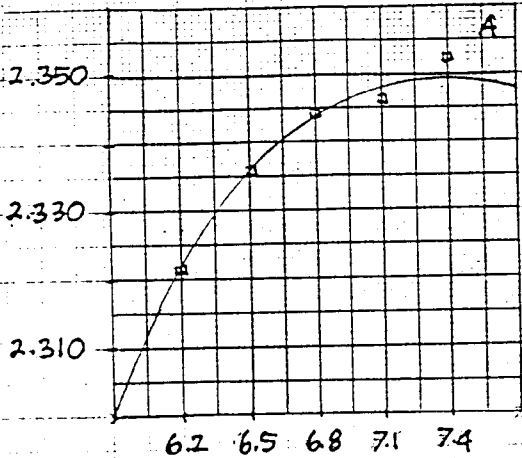
Δh = change in height of specimen

h_0 = original height of specimen

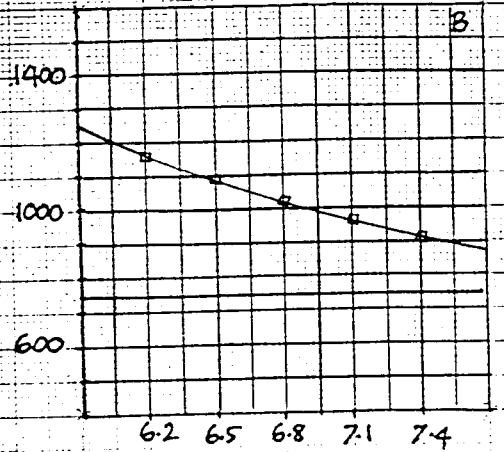
ANALISA TES MARSHALL MATERIAL HOT BIN

LAMPIRAN 10

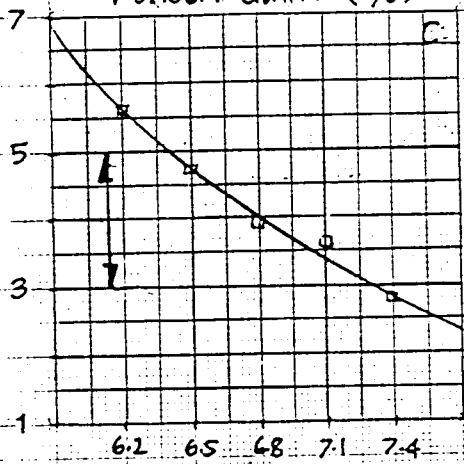
BULK-CAMPURAN (G/CC)



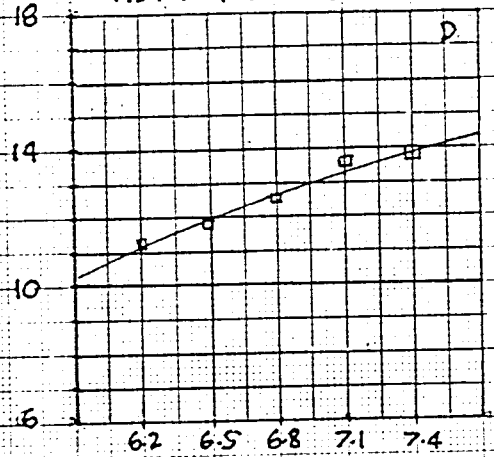
STABILITAS (KG)



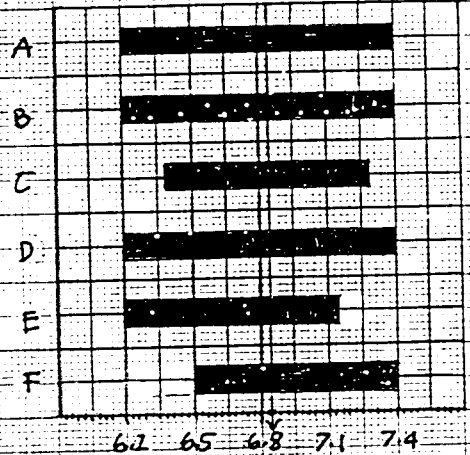
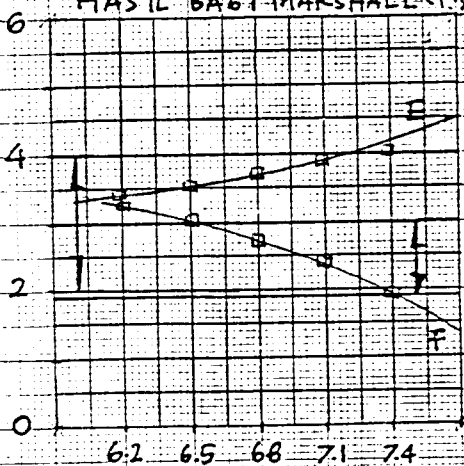
POROSGA UDARA (%)



TEBAL LAPISAN ASPAL FILM (cm)



KELELAHAN (MM) & HASIL BAGI MARSHALL (KN/MM)



DI KERJAKAN

[Signature]

KONTRAKTOR

DI PERIKSA

[Signature]

PENGAWAS LAB

MENGETAHUI

[Signature]

QUALITY CONTROL

HIGHWAY MAINTENANCE AND BETTERMENT PROJECT
**SIFAT-SIFAT CAMPURAN ASPAL HIGH - DURABILITY
 DENGAN METODE MARSHALL**

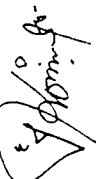
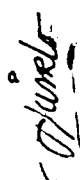

MIX DESIGN : SMA + CF
 TUJUAN : _____

KONTRAK ARPERI UTARA - TIMUR
 KONTRAKTOR M. PRATAMA ADYATAMA
 CAMPURAN DIHAMPAR DI _____

AGREGAT		α (OV DRY)	α (IAPF)
a. HOT BIT II		2.649	2.748
b. HOT BIT III		2.603	2.707
c. HOT BIT IV		2.711	2.815
d. FILLER		2.761	2.761

ANGKA PENETRASI ASPAL 60/70
 BERAT JENIS ASPAL (T) 1.0405
 DIUJI OLEH _____
 TANGGAL 29/2/1995

No. BENDA UJI	TINGGI BENDA UJI	PROPORSI CAMPURAN (% Berat agregat gabungan)				KADAR ASPAL	BD BULK DARI TOTAL AGREGAT	BD EFEKTIF DARI TOTAL AGREGAT	BD MAKSIMUM CAMPURAN	BERAT (gram)			IBI BENDA UJI	DO BULK CAMPURAN	RONGGA UDARA	STABILITAS - Kg		KELELEHAN PLASTIS (mm)	HABIL BADI MARSHALL (Kg/mm)	LUAS PERMUKAAN AGREGAT (m ² /km)	PENYERAPAN ASPAL (% berat dan jumlah campuran)	TEBAL LARIPAN ASPAL FILM (L.M)
		a	b	c	d					Di BACA	Di M	Di BACA				Di M	P					
1		55	18	22	5	6.84	2.659	2.707	2.441	1264.5	731.1	1268.3	537.2	2.354	430	1093.7	3.9	1093.7	5.07	0.67	12.55	
2		55	18	22	5	6.84	2.659	2.707	2.441	1264.3	731.7	1269.2	537.5	2.352	420	1019.5	3.9	1019.5	5.07	0.67	12.55	
Rata - Rata		55	18	22	5	6.84	2.659	2.707	2.441	1257.6	728.1	1261.9	533.8	2.356	335	899.4	3.4	899.4	5.07	0.67	12.55	
1		55	19	22	5	6.84	2.659	2.707	2.441	1261.5	727.8	1264.1	536.3	2.352	340	825.3	3.7	825.3	5.07	0.67	12.55	
2		55	19	22	5	6.84	2.659	2.707	2.441	1261.5	727.8	1264.1	536.3	2.352	340	825.3	3.7	825.3	5.07	0.67	12.55	
Rata - Rata		55	19	22	5	6.84	2.659	2.707	2.441	1261.5	727.8	1264.1	536.3	2.352	340	825.3	3.7	825.3	5.07	0.67	12.55	
KETERANGAN : Stabilitas yang tercapai setelah perendaman selama 29 jam dengan proporsi campuran 55/18/22/5 & kadar aspal yang sama : 832.3 = 80.7% 1031.6																						

DIKERJAKAN 
 DI PERIKSA 
 MENGETAHUI 

PENGAWAS LAB
 BINA MARGA

KONTRAKTOR

QUALITY . E

HIGHWAY MAINTENANCE AND BETTERMENT PROJECT
**SIFAT-SIFAT CAMPURAN ASPAL HIGH - DURABILITY
 DENGAN METODE MARSHALL**

MIX DESIGN : 5MA + CF
 TUJUAN : _____

KONTRAK APERI UTARA - TIMUR
 KONTRAKTOR PT. DELAMARGA ADYATAMA
 CAMPURAN DIHAMPAR DI _____

AGREGAT	a (OV DRY)	a (APP)
a. HOT BIT II	2.649	2.748
b. HOT BIT III	2.603	2.707
c. HOT BIT IV	2.711	2.815
d. FILLER	2.761	2.761
e.		

ANGKA PENETRASI ASPAL 60/70
 BERAT JENIS ASPAL (T) 1.0405
 DIUJI OLEH _____ TANGGAL / / 19

No. BENDA UJI	TINGGI BENDA UJI	PROPORSI CAMPURAN (% Berat agregat gabungan)					KADAR ASPAL	BD BULK DARI TOTAL AGREGAT	BD DARI TOTAL AGREGAT	BD EFektif DARI TOTAL AGREGAT	BD Maksimum Campuran	BERAT (Gram)		ISI BENDA UJI	DO BULK CAMPURAN	RONGGA UDARA	STABILITAS - Kg		KELELEHAN PLASTIS (m.m)	HASIL BAGI MARSHALL (Kg/mm)	LUAS PERMUKA AN AGREGAT (m ² /km)	PENYERAPAN ASPAL (% Berat dan jumlah cam purnal)	TEBAL LAPISAN ASPAL (L.M)	
		a	b	c	d	e						DALAM UDARA	DARI UDARA				L	M						N
1																								
2																								
Rata-Rata		55	18	22	5	6.2	2.659	2.707	2.462															
1																								
2																								
Rata-Rata		55	18	22	5	6.5	2.659	2.707	2.452															
1																								
2																								
Rata-Rata		55	18	22	5	6.8	2.659	2.707	2.441															

LAMPIRAN 12

MENGETAHUI

DI PERIKSA

DI KERJAKAN

KONTRAKTOR

PENGAWAS LAB

QUALITY • E

BIKA MARGA

HIGHWAY MAINTENANCE AND BETTERMENT PROJECT

SIFAT-SIFAT CAMPURAN ASPAL HIGH - DURABILITY
DENGAN METODE MARSHALL

MIX DESIGN : SMA + CF
TUJUAN :

KONTRAK ARYANI UTARA - TIMUR
KONTRAKTOR PT. DELAMARSA ADYATAMA
CAMPURAN DIHAMPAR DI

AGREGAT	a (OV DRY)	a (APP)
a. HOT BIN II	2.649	2.748
b. HOT BIN III	2.603	2.707
c. HOT BIN IV	2.711	2.815
d. FILLER	2.761	2.761

ANGKA PENETRASI ASPAL 60/70
BERAT JENIS ASPAL (T) 1.0405
DIUJI OLEH _____ TANGGAL ____ / ____ / 19 ____

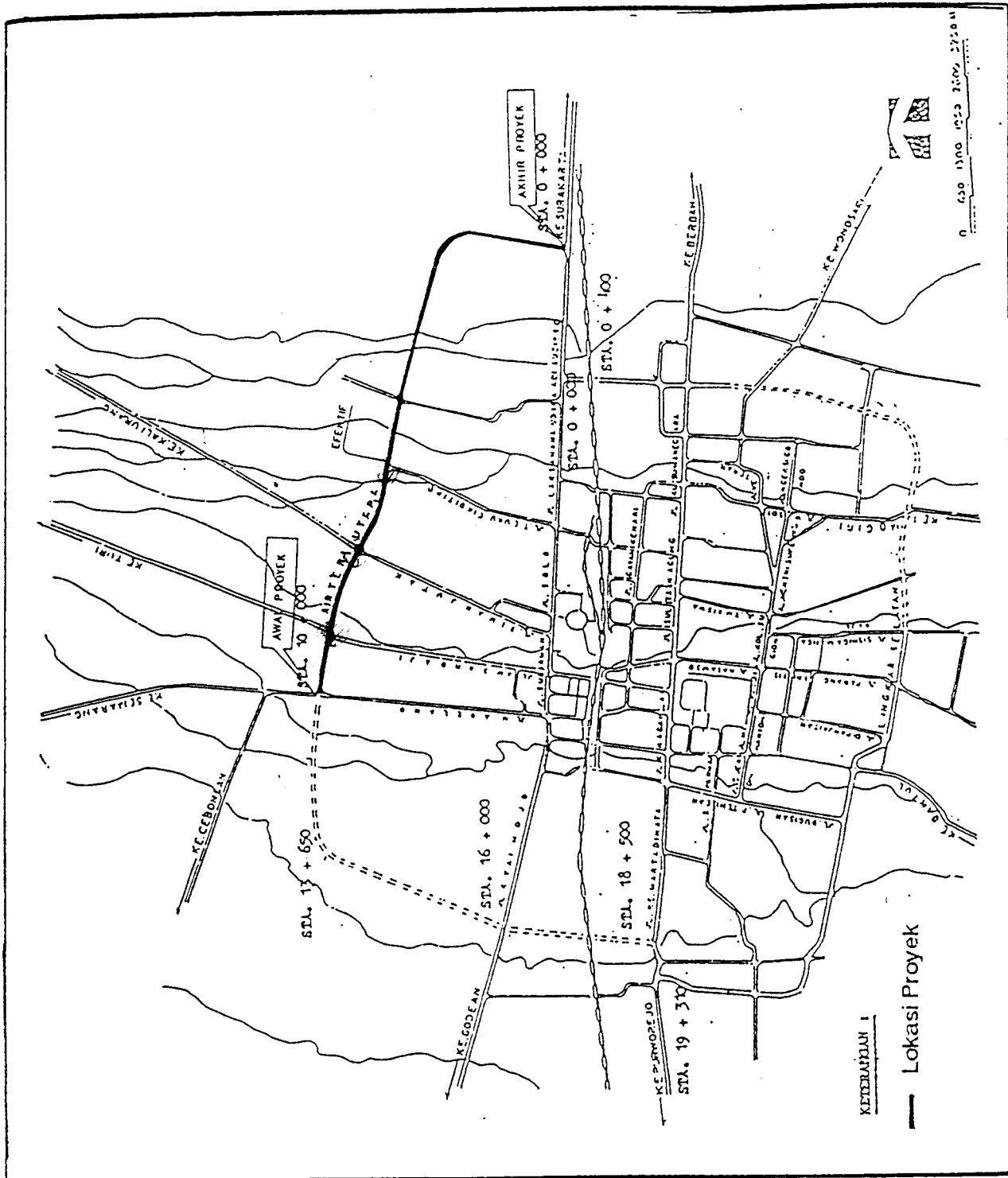
No. BENDA UJI	TINGGI BENDA UJI	PROPORSI CAMPURAN (% Berat agregat gabungan)					KADAR ASPAL	BD BULK DARI TOTAL AGREGAT	BD SPESIFIK DARI TOTAL AGREGAT	BD MAKSIMUM CAMPURAN	BERAT (g/mm)			RENDAH UJI	DD BULK CAMPURAN	KONGGA UDARA	STABILITAS . Kg		KELELEHAN PLASTIS (m.m)	HASIL BAKU MARSHALL (Kt/mm)	LUAS PERMUKAAN AGREGAT (m ² /km)	PENYERAPAN ASPAL (% Berat dan jumlah campuran)	TEBAL LAPISAN ASPAL FILM (L.M)
		a	b	c	d	e					DARI UDARA	DALAM AIR	KERING PERMUKAAN				H	G					
1		55	18	22	5	7.1	2.659	2.707	2.431	1258.2	724.8	1260.9	536.1	2.347	402	975.8	3.9	2.43	5.07	0.65	13.16		
2										1258.1	724.8	1261.3	536.5	2.345	395	958.8	3.9						
Rata - Rata																							
1										1261.9	726.8	1264.0	537.2	2.349	330	801.0	4.2						
2										1262.3	728.8	1264.8	536.0	2.355	337	818.0	3.9						
Rata - Rata																							
		55	18	22	5	7.4	2.659	2.707	2.420														

DIKERJAKAN
[Signature]
KONTRAKTOR

DI PERIKSA
[Signature]
PENGAWAS LAB

MENGETAHUI
[Signature]
QUALITY . E
RIFA MARGA

PETA LOKASI



☐ = Kontrak Asli
(CCO No. 1)

☐ = Penambahan
Panjang
3850 M

mix is composed of. $V_v = 100 \frac{2.296}{2.853} = 80.5$

$V_b = 100 \frac{2.43}{2.597} - 80.5 = 13.1$

$V_a = 100 (1 - \frac{2.43}{2.597}) = 6.4$

sum $V_v + V_b + V_a$ must be 100: $80.5 + 13.1 + 6.4 =$

Determination of the stiffness modulus of bituminous mixes

If the stiffness of the bitumen from Fig. A2.1 and the volumetric composition of the mix are known, the stiffness modulus of the mix is obtained from the nomograph* (Fig. A2.3).

EXAMPLE

Stiffness modulus of the bitumen under the operating conditions:

$E_b = 2.0 \times 10^9 \text{ N/m}^2$

Volume percentage of bitumen:

$V_b = 13.1$

Volume percentage of aggregates:

$V_a = 80.5$

Stiffness modulus of the mix is:

$E_m = 1.1 \times 10^{10} \text{ N/m}^2$

The accuracy of the nomograph, as checked by extension measurements on a large number of different asphalt mixes, is a factor of 1.5-2, which is sufficient for practical purposes.

The stiffness of a particular mix derived from the nomograph can be plotted in Chart M-1 of the Manual as a function of bitumen stiffness, or in Chart M-2 as a function of temperature for a loading time of $t = 0.02 \text{ s}$. The

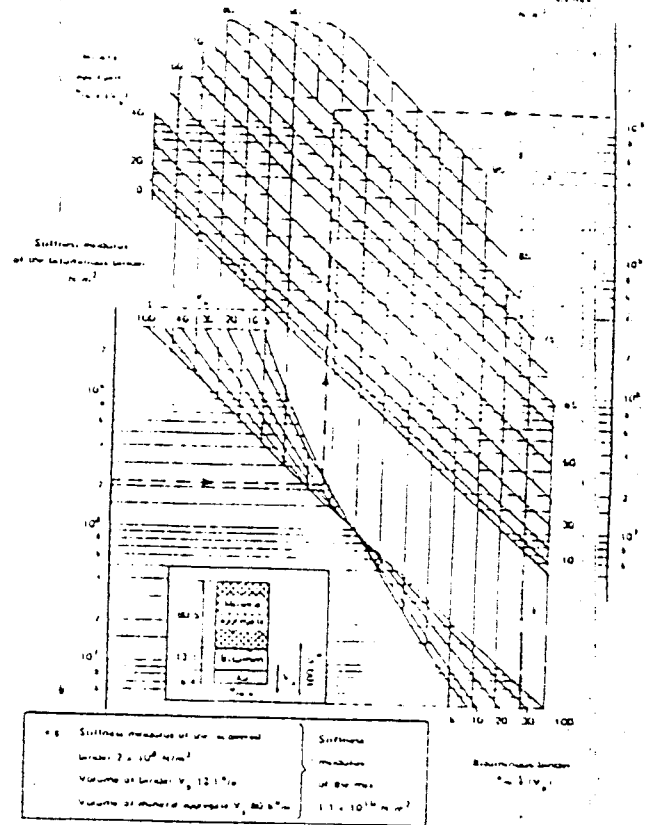


Figure A2.3. Nomograph for mix stiffness

mix stiffness curve thus obtained can be compared with those used for the thickness Charts (see Chapter 8, Section 2.1 of the Manual).

Appendix 3 Fatigue

Introduction

Usually, the fatigue criterion for the asphalt layers is given in terms of the permissible strain as a function of the number of load repetitions and modulus of the asphalt. The behaviour of the bituminous mixes is usually investigated in laboratory tests using stress or strain repetition, 2-, 3- or 4-point bending tests, employing specimens of relatively small dimensions. The fatigue life of a material for a given initial stress or strain value is usually defined as the number of load applications at which the initial stress or strain value has changed by any factor.

Although these laboratory tests provide valuable information on the relative performance of different materials, the relation to performance in practice under loading conditions is doubtful. Another complicating factor is that different test methods produce different results (e.g. controlled-stress versus controlled-strain). In addition, allowance has to be made for the effects of intermittent loading and healing that occur under practical conditions.

From fatigue studies carried out with a wheel tracking machine on asphalt slabs under a rolling wheel it was concluded that the crack patterns observed were very similar to those defined as alligator (fatigue) cracking in practice and that the results of controlled-strain bending tests could be used as a criterion of fatigue.

Fatigue measurements were therefore made on several mix types (details of some are given in Table A3.1). The objective was to express the results in a form that could be used for the prediction of fatigue behaviour from easily determined mix characteristics.

Two different approaches have been developed. The first is based on direct interpretation of the fatigue measurements, while the second is based on the same measurements but interpreted using a dissipated energy concept. These two alternative approaches to fatigue prediction are summarized below.

The first is based on direct interpretation of the fatigue measurements, while the second is based on the same measurements but interpreted using a dissipated energy concept. These two alternative approaches to fatigue prediction are summarized below.

Mix no.	1	2	3	4	5	6	7
Mix type	Dense asphaltic concrete	Dense bitumen macadam	Gravel sand asphalt	Lean bitumen macadam	Rolled asphalt, base course mix	French "Grave bitume"	Bitumen sand, base course
Mix composition (as made up)							
Stone, %m	} 90.2*	61.9	47.4	94.2	62.0	66.8	—
Sand, %m		38.1	39.9	—	32.0	21.1	96.1**
Filler, %m	3.8	5.2	7.6	2.9	—	8.2	—
Content, %m	6.0	4.8	5.1	2.9	6.0	3.9	3.9
Bitumen Grade	40/50	80/100	45/60	80/100	40/60	40/50	45/60
Mix properties							
V _v , %v	84.1	85.6	78.0	61.9	83.7	81.4	70.8
V _b , %v	14.2	11.0	11.0	4.9	14.1	9.3	8.9
VIM, %v	1.7	3.4	11.0	33.2	2.2	9.3	20.3
VMA, %v	15.9	14.4	22.0	38.1	16.3	18.6	29.2
VFB, %	89.3	76.4	50.0	13.0	86.5	50.0	30.5

* 46.0 % m stones 2 - 10 mm, 37.6 % m stones 0 - 3 mm and 6.6 % m sand
 ** 63.4 % m river sand and 32.7 % m foreshore sand

For meanings of abbreviations, please refer to glossary.

the first approach

Figure A3.1

The fatigue data on different bituminous mixes* cover a wide range of mix types (see Table A3.1 for some examples) and of testing conditions.

For a given mix, the fatigue curves, represented by $\epsilon_{fa} = k \times N_{fa}^{-n}$ (k and n being mix constants), obtained at different temperatures have different slopes (n-values) in a $\log \epsilon_{fa}$ -log N_{fa} plot. No simple correlations have yet been found between these slopes and the mix characteristics. Simplified approximations therefore have to be made.

1st approximation

Assume that the slopes of the fatigue curves have the same value, n = 5.

In the interpretation of the fatigue measurements it is assumed that the fatigue strain (ϵ_{fa}) for failure after a fixed number of loading cycles (N_{fa}) is a function of the mix stiffness modulus S_{mix} . These curves, on a log-log scale, are considered as straight lines.

No simple relationship between the slopes of these lines and mix characteristics has been found. Therefore, in a second approximation, assume that the slopes of the log ϵ_{fa} versus log S_{mix} relation are all equal to -0.36, so that:

$$\log \epsilon_{fa} = -0.36 \log S_{mix} + \text{constant} \quad (1)$$

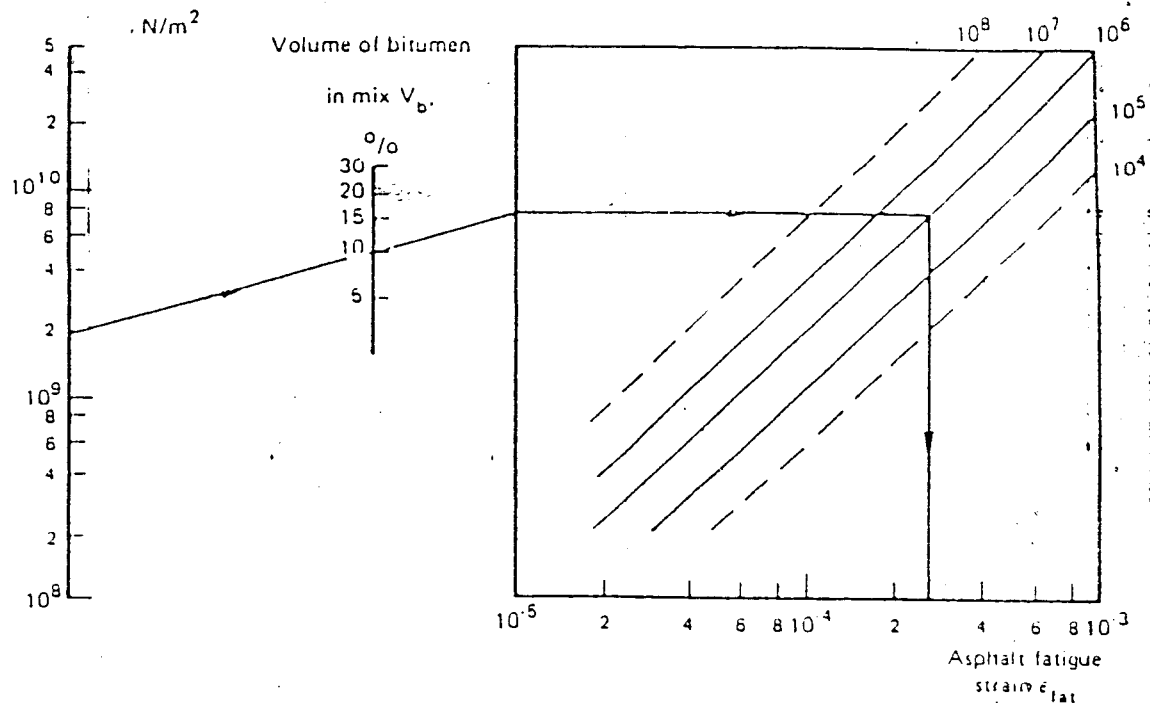
for a fixed number of loading cycles

The value of the constant has been determined from the measurements. It has been found that the fatigue strain for failure at 10⁶ cycles (ϵ_{fa})_{10⁶} for a mix stiffness modulus of 5 x 10⁸ N/m² increases as the volume of the bitumen in the mix (V_b) increases in accordance with the equation:

$$\epsilon_{fa} = (17.4 \times V_b + 22) \times 10^{-7} \quad (2)$$

* See ref. 5 in the Bibliography

stiffness modulus of the mix S_{mix}



Example: If $S_{mix} = 2 \times 10^9 \text{ N/m}^2$
 $V_b = 10\%$
 $N_{fat} = 10^6$
 then $\epsilon_{fat} = 2.7 \times 10^{-4}$

1.1. Fatigue nomograph based on S_{mix} and V_b

Equations (1) and (2):

$$\sigma = (17.4 \times V_b + 22) \times 10^4 \times \left(\frac{S_{mix}}{3 \times 10^7} \right)^{0.16} \quad (3)$$

According to the first assumption, $N_{fat} = k \times \epsilon_{fat}^{-n}$ and $n = 4.5$

$$\epsilon_{fat} = 10^4 \left(\frac{N_{fat}}{10^6} \right)^{-0.22} \quad (4)$$

Substituting from equations (3) and (4):

$$(0.856 \times V_b + 1.08) S_{mix}^{0.16} \times N_{fat}^{0.22} \quad (5)$$

Equation (5) has provided the basis for a nomograph, shown in Fig. A3.1, from which the permissible asphalt fatigue strain can be predicted when two parameters are known.

Stiffness modulus of the asphalt mix, S_{mix} , N/m^2 (see Appendix 2);

Volume of the bitumen in the mix, V_b , % (see Appendix 1).

3. The second approach

Nomograph: Fig. A3.4

The fatigue data used in the first approach can also be interpreted via a dissipated energy concept.

3.1. The dissipated energy concept

It can be shown that the total dissipated energy to fatigue is a function of the fatigue life, and that this function is unique for every mix. The dissipated energy per cycle per unit volume can be expressed by:

$$W_f = \pi \times \sigma \times \epsilon \times \sin \phi \quad (6)$$

where σ , and ϵ are the stress and strain amplitude during the loading cycle respectively and ϕ is the phase angle between the stress and strain wave signals for that loading cycle. During a controlled-strain test the stress amplitude and the phase angle change. This means that for the calculation of the total dissipated energy the functions of the stress and phase angle have to be integrated over the

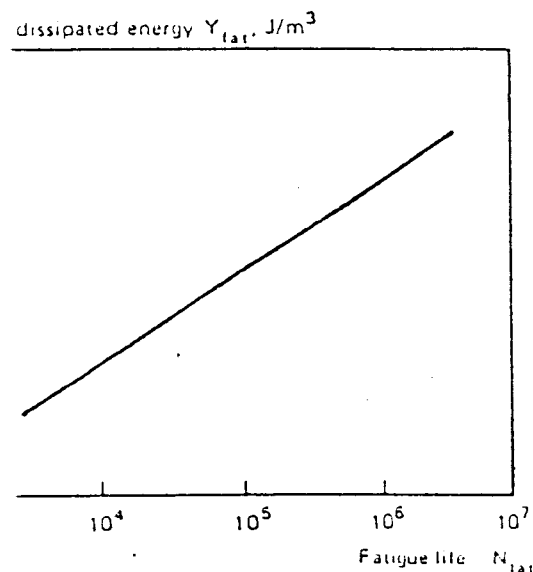
loading cycles concerned. This integration is aided by a summation of the energy into fixed or "constant" cycles, i.e. cycles during which it is assumed that the stress and phase angle in that are nearly constant. Hence:

$$Y_{fat} = \pi \times \sigma_c \times \epsilon_c \times \sin \phi_c \quad (7)$$

For a given mix the total dissipated energy can be given as a function of the number of strain repetitions to be shown in Fig. A3.2. This energy relation for a given mix is independent of test method or testing conditions. The relation between the number of loading cycles (N_{fat}) and the total dissipated energy per unit volume of fatigue (Y_{fat}) can be given as:

$$Y_{fat} = C \times N_{fat}^m \quad (8)$$

where C and m are constants specific to a particular mix. This relationship characterizes the fatigue behaviour of a material independent of test conditions. The parameters C and m can be regarded as material constants. From the energy relation it follows that at a higher stiffness of the mix more total energy per unit volume is dissipated. The relation shows that the number of loading cycles to failure is related to the total dissipated energy to the same point.



2. Dissipated energy vs. fatigue life

Permissible strain

The relation between the total dissipated energy to failure and the fatigue life, on the one hand, and the total dissipated energy per volume, on the other hand, can be used to derive an expression for the permissible strain.

Due to the fact that the dissipated energy per cycle changes during the test a parameter ψ is introduced, which is the ratio between the calculated total dissipated energy, based on the initial values of stress and phase angle, and the real total dissipated energy per volume:

$$\psi = Y_{calc}/Y_{fat}$$

where $Y_{calc} = \pi \times \sigma_c \times \epsilon_c \times \sin \phi_c$, with σ_c , ϵ_c and ϕ_c being the initial values for, respectively, the stress, strain and phase angle in the fatigue test. It has been found that the energy ratio factor depends mainly on the type of test and the stiffness modulus of the asphalt mix.

Using the relation for total dissipated energy and number of loadings, together with the expression for ψ and the initial stiffness modulus $S_{mix} = \frac{\sigma_c}{\epsilon_c}$, the following relation between permissible strain ϵ_{perm} and fatigue life can be obtained:

$$\epsilon_{perm} = \left(\frac{C \times \psi}{\pi \times S_{mix} \times \sin \phi_c} \right)^{1/2} \times N_{fat}^{m/2} \quad (10)$$

in which ϕ_c and ψ are functions of the stiffness modulus, S_{mix} .

As mentioned above, the controlled-strain test is recommended as the representative test for the fatigue failure as observed in practice. For such conditions the mean value of the factor can be taken as equal to 1.25.

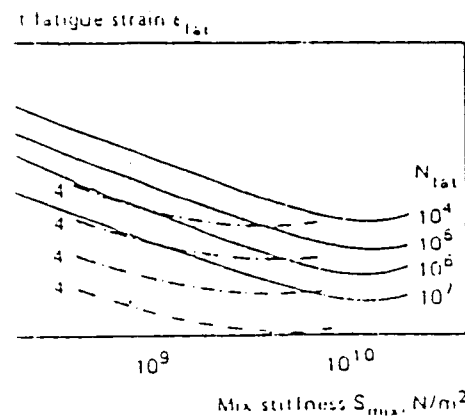
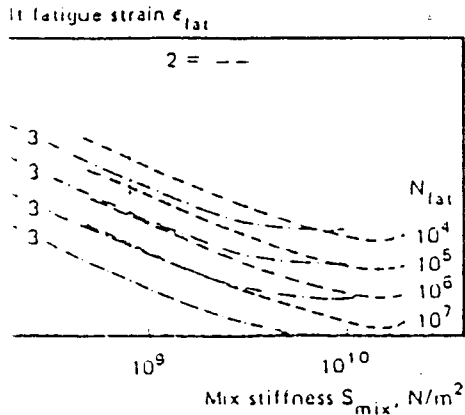
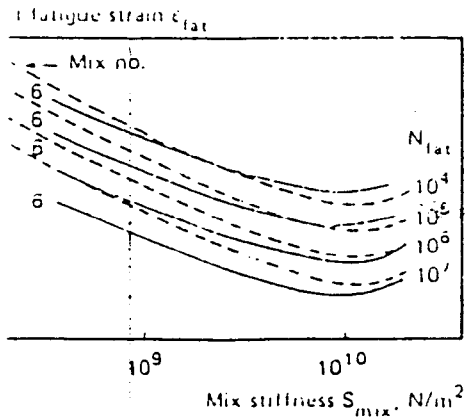
Using the relation given by (10) the permissible strain has been calculated as a function of the mix stiffness modulus for different fatigue lives, the material constants being determined in bending tests. Typical results for different mixes are shown in Fig. A3.3. The composition of the mixes is given in Table A3.1. The mix constants C and m are given in Table A3.2.

Table A3.2. Values for C and m in the relation $Y_{fat} = C \times N_{fat}^m$

Mix no.	$C, J/m^3$	m
1	3.0×10^4	0.72
2	1.9×10^4	0.70
3	1.8×10^4	0.64
4	1.3×10^4	0.61
5	2.5×10^4	0.70
6	5.3×10^4	0.64
7	2.1×10^4	0.64

These calculated permissible asphalt strain values have been compared with more than 200 measurements of the fatigue strain of different mixes. The correlation between the measured and calculated strains is good. When ψ is fixed at 1.25 one finds some systematic difference between calculated and measured fatigue strain. To compensate for this difference equation (10) can be adjusted as follows (for $\psi = 1.25$):

$$\epsilon_{perm} = 3.6 \left(\frac{C}{\pi \times S_{mix} \times \sin \phi_c} \right)^{1/2} \times N_{fat}^{m/2} \quad (11)$$



Fatigue properties of different mixes

It can be graphically represented in a nomogram shown in Fig. A3.4. To enter this nomogram the following parameters are required:
 1. Stiffness modulus of the asphalt mix, S_{mix} , N/m^2 (see below);
 2. Phase angle between the stress and the strain ϕ , (see below);
 3. Parameters C , J/m^3 , and m (see Tables A3.1 and A3.2, see below).

The nomogram shown in Fig. A3.5, which relates phase angle and mix stiffness modulus, shows a nomogram from which the phase angle of the stiffness modulus and volume of bitumen (see Appendix 2) can be determined.

Determination of the mix parameters C and m
 As an approximation the data for another mix which resembles the mix in question should be used. If no such data are available, fatigue tests should be carried out.

- Ex: Stiffness modulus of recovered bitumen: $S_{bit} = 4 \times 10^7 \text{ N/m}^2$
- Volume of bitumen: $V_b = 17\%$
- Phase angle of asphalt mix: $\phi = 32^\circ$

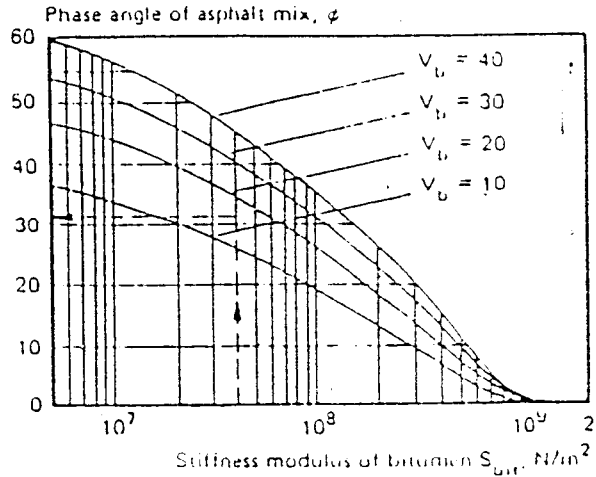
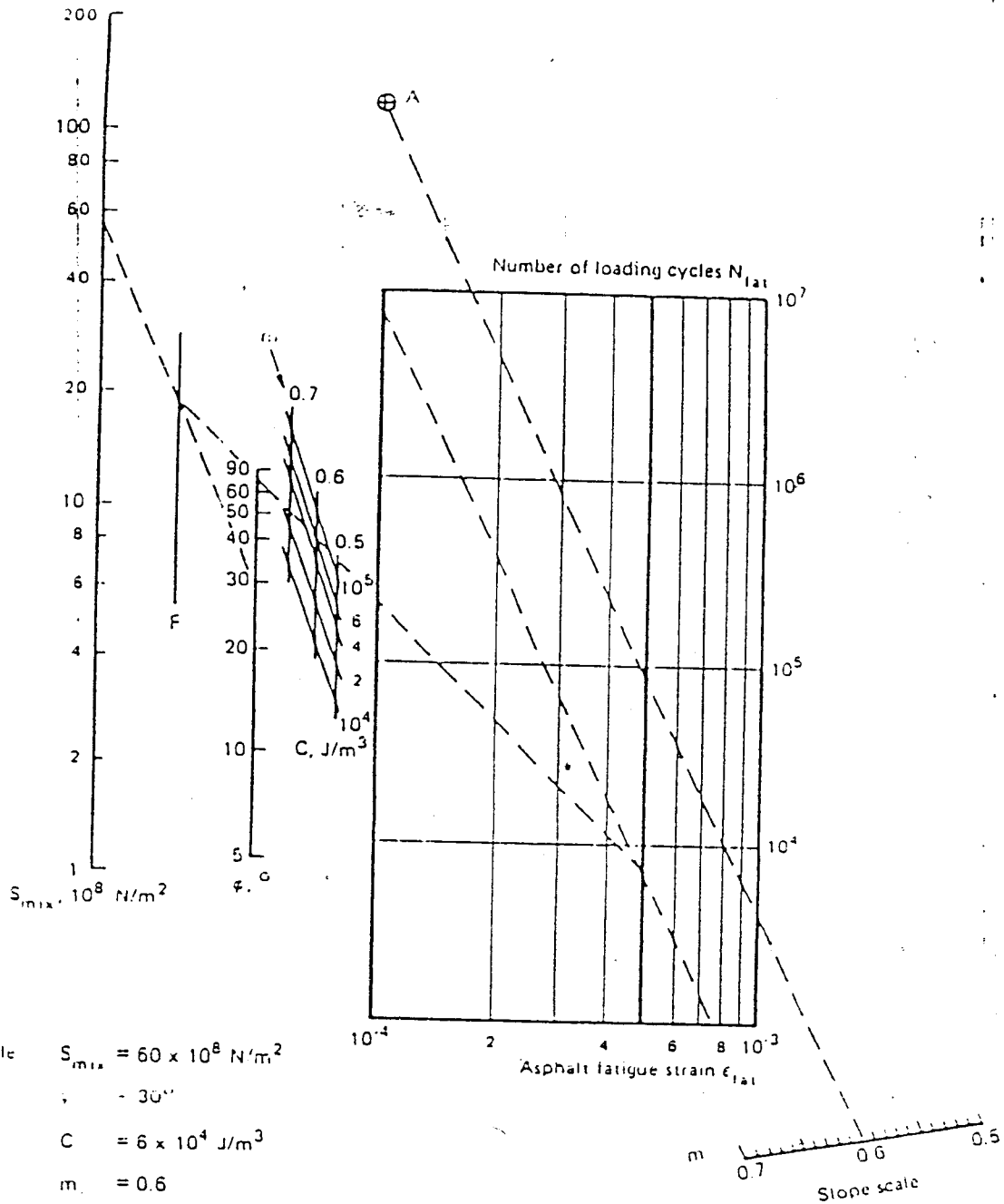


Figure A3.5. Nomograph for phase angle of mixes

4. Correlation between laboratory fatigue tests and practice

The fatigue data obtained in the laboratory cannot be applied directly to thickness design since in practice the mode of loading (random pulse loading with rest periods) and spectrum of strain values (random distribution due to different loads and lateral distribution of loads) are different from laboratory conditions (usually sinusoidal loading and fixed strain or stress level during one test). There are also indications that some healing occurs in practice and that intermittent loading has a less damaging effect than continuous loading. For these effects correction factors for the design life should be applied. Allowance should also be made for the transverse distribution of wheel loads. In addition, the fatigue life of a pavement is influenced by the temperature variations in the asphalt layer. Since both the stiffness modulus of the asphalt mix and the permissible asphalt strain depend on the temperature, the calculation of the effective design life of a pavement is fairly complicated. Therefore, it is considered more feasible to relate the pavement fatigue life to the effective mix stiffness which, in its turn, is related to the weighted mean annual air temperature (w-MAAT). This leads to the introduction of another correction factor for the design life.

Due to the effects of heating and intermittent loading the effective fatigue life is taken to be a factor of 2-10 higher, depending on the mix type (a lower factor for open lean mixes and a higher factor for dense/rich mixes). The transverse distribution of wheel loads over the pavement results in an increase in effective design life by a factor of about 2.5. Temperature variations in the asphalt layer



Example $S_{mix} = 60 \times 10^8 \text{ N/m}^2$
 $\phi = 30^\circ$
 $C = 6 \times 10^4 \text{ J/m}^3$
 $m = 0.6$

Connect the value on the S_{mix} line to the value on the ϕ line. The intersection with the F line is then connected to the point (m, C) in the m-C grid. This line will intersect the ϵ_{fat} ($= 5 \times 10^{-4}$) line. Then draw a line from a point on the second m scale through reference point A. Finally draw a line parallel through the point previously determined on the ϵ_{fat} line.

4. Fatigue nomograph based on energy

effective design life by a factor of 1-3, dependent on MAAT and the asphalt thickness (a low factor for low to moderate temperatures asphalt layers and a higher factor for higher temperatures in conjunction with thicker asphalt layers). The correction factor is of the order of 10-20 for higher design life.

A point worth mentioning is that the effect of crack propagation, viz. the number of load applications between crack initiation and the appearance of cracks at the pavement surface, is taken into account by using the fatigue life as obtained from controlled-strain bending tests, which correlated well with the failure stage of propagated cracks in the wheel tracking test on asphalt slabs.

Location of maximum asphalt strain in the pavement

Usually, the maximum tensile asphalt strain is found at the bottom of the asphalt layer, either on the vertical axis or at the centre of the loaded area or on the vertical axis of symmetry between the two loaded areas. In some cases, with high modular ratios between base and asphalt, the maximum horizontal asphalt strain is found not at the bottom of the asphalt layer but higher up. From previous calculations it has been found that the level at which the maximum horizontal asphalt strain occurs depends on the parameter c :

$$c = h_1 \times E_2/E_1, \text{ mm}^2$$

E_1 (S_{max}) and E_2 are the moduli (in N/m^2) of the bound and unbound base layer respectively, and h_1 is the thickness of the asphalt layer in mm.

If $c > 133$ mm, the maximum asphalt strain is not at the bottom of the asphalt layer. In this case, when h_1 is less than approx. 200 mm, the maximum asphalt strain is found in the lower half of h_1 , and when h_1 is higher than 200 mm, the maximum strain is found in the upper half of h_1 . The thickness Charts for pavements with unbound base layers is relevant only to climates with w-M.A.A.T. For convenience, Figs. A3.6-9 can be used for overlays to check whether the maximum asphalt strain

is at the bottom of the asphalt layer or not. If, for a particular mix code and subgrade modulus, the asphalt thickness derived from a Chart is found above the relevant curve in one of the Figs. A3.6-9, the maximum asphalt strain is not at the bottom. For example, if for w-M.A.A.T = 28°C, $E_2 = 5 \times 10^7 N/m^2$, $N = 2 \times 10^6$ and mix code S2-F1-100, the total asphalt thickness $h_1 = 260$ mm is found (from Chart HN 63) for $h_2 = 300$ mm, it can be seen in Fig. A3.9 that this point is above the curve for $E_1 = 5 \times 10^7 N/m^2$, so the maximum asphalt strain is not at the bottom but in the upper half of the asphalt layer. The effective base modulus (E_2) will be approx. $1.3 \times 10^7 N/m^2$, and the effective mix stiffness (S_{max} or E_1) is about $1.7 \times 10^7 N/m^2$ (for w-M.A.A.T = 28°C and $h_1 = 200$ mm). $T_{max} = 38°C$ is found from Chart RT; S_{max} is found from Chart M-2 for T_{max}). The parameter c is therefore: $260 \times 1.3 \times 10^7 / 1.7 \times 10^7 = 200$ mm.

This aspect is of importance in the design of overlays. If, for the example given above, the total asphalt layer consisted of a 160 mm overlay over an original asphalt layer of 100 mm thickness, the maximum asphalt strain would occur in the overlay. In such a case the magnitude of the asphalt strain in the original asphalt layer should be estimated or calculated in order to check the design with respect to the residual fatigue life of the original asphalt.

This relation is only valid in the case of unbound base layers and the type of load configuration used as a basis in this Manual. For the determination of the effective E_2 , see refs. 13 and 15 in the Bibliography.