

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

A. Perkerasan Jalan

Perkerasan jalan merupakan konstruksi jalan yang diperuntukkan bagi lalu lintas yang terletak di atas tanah dasar, terdiri dari beberapa lapisan bahan dengan kualitas yang berbeda-beda. Menurut Sukirman (1999), berdasarkan bahan pengikatnya konstruksi perkerasan jalan dapat dibedakan atas:

1. Perkerasan lentur (*flexible pavement*), yaitu perkerasan yang menggunakan aspal sebagai bahan pengikat. Lapisan-lapisan perkerasannya bersifat memikul dan menyebarkan beban lalu lintas ke tanah dasar.
2. Perkerasan kaku (*rigid pavement*), yaitu perkerasan yang menggunakan semen (*portland cement*) sebagai bahan pengikat. Pelat beton dengan atau tanpa tulangan diletakkan di atas tanah dasar dengan atau tanpa lapisan fondasi bawah. Beban lalu lintas sebagian besar dipikul oleh plat beton.
3. Perkerasan komposit (*composite pavement*), yaitu perkerasan kaku yang dikombinasikan dengan perkerasan lentur, dapat berupa perkerasan lentur di atas perkerasan kaku atau perkerasan kaku di atas perkerasan lentur.

B. Kinerja Perkerasan

Karakteristik campuran suatu lapis perkerasan merupakan salah satu faktor untuk mengetahui kinerja perkerasan. Karakteristik campuran dipengaruhi oleh komposisi dari masing-masing bahan, baik dari segi kualitas maupun spesifikasi yang telah dipenuhi, serta selama proses pelaksanaan campuran tersebut dilaksanakan. Adapun karakteristik campuran untuk aspal beton yang harus dimiliki oleh campuran aspal beton campuran panas adalah:

1. Stabilitas

Stabilitas lapisan perkerasan jalan adalah kemampuan lapisan perkerasan menerima beban lalu lintas tanpa terjadi perubahan bentuk tetap seperti gelombang, alur ataupun *bleeding* (Sukirman, 1999). Stabilitas aspal beton

selama pengerjaannya. Kekuatan harus cukup untuk membawa beban tanpa terjadi pergeseran antara partikel agar struktur tetap utuh. Peranan penting gesekan antara butir merupakan faktor utama kekuatan. Campuran dengan gradasi padat terdiri dari partikel dengan tekstur kasar dan kadar aspal relatif kecil sehingga sangat baik untuk memperoleh kekuatan gesekan yang tinggi.

2. Durabilitas

Durabilitas berperan pada lapisan permukaan agar mampu menahan keausan akibat pengaruh cuaca, air dan perubahan temperatur serta keausan akibat gesekan kendaraan.

Durabilitas untuk aspal beton sangat penting untuk menjaga stabilitas dan tahanan geser selama umur pelayanan. Ada beberapa faktor yang mempengaruhi durabilitas lapis aspal beton, antara lain:

- a. Film aspal atau selimut aspal yang tebal akan berfungsi maksimal dalam menghasilkan lapis aspal beton berdurabilitas tinggi, dan kedap air, sehingga kemampuannya dalam menahan keausan semakin baik. Namun ketebalan dari selimut aspal juga perlu diperhatikan untuk mencegah terjadinya *bleeding* yang dapat mengakibatkan permukaan menjadi licin.
- b. Persentase VITM (*Void In The Mix*) yang minimum, membuat lapisan kedap air dan mengurangi terjadinya oksidasi.
- c. Persentase VMA (*Void In Mineral Aggregate*) yang besar, sehingga film aspal dibuat tebal.

3. Fleksibilitas

Fleksibilitas berperan penting pada perkerasan yang bersifat dapat mendistribusikan beban lalu lintas tanpa retak atau deformasi permanen. Untuk mencapai kelenturan yang tinggi diperlukan VMA yang besar, VIM yang kecil, dan pemadatan aspal dengan penetrasi tinggi (Sukirman, 1999)

4. Ketahanan terhadap kelelahan (*fatigue resistance*)

Salah satu kegagalan perkerasan adalah apabila terjadi retak karena kelelahan atau suhu rendah. Fleksibilitas adalah kemampuan lapis aspal beton untuk menerima lendutan berulang tanpa terjadinya kelelahan berupa alur (*rutting*) dan retak (Sukirman, 1999).

5. *Skid resistance*

Skid resistance adalah koefisien gesek yang dimiliki aspal beton agar dalam kondisi basah maupun kering, kendaraan tidak tergelincir ataupun selip. Ada beberapa faktor yang mempengaruhi nilai tahanan geser yaitu penggunaan kadar aspal yang tepat, tekstur permukaan agregat, bentuk partikel agregat, gradasi agregat, kepadatan campuran dan tebal film aspal (Sukirman, 1999).

6. *Workability*

Workability adalah kemampuan campuran beton aspal dalam pengerjaannya, baik dari proses pencampuran, penghamparan dan pemadatan. Adapun faktor yang mempengaruhi kemudahan dalam pelaksanaannya antara lain gradasi agregat, temperatur campuran, kandungan *filler* dan viskositas aspal.

7. Impermeabilitas

Impermeabilitas atau kedap air adalah kemampuan beton aspal untuk tidak dapat dimasuki air ataupun udara ke dalam lapisan beton aspal. Air dan udara dapat mengakibatkan percepatan proses penuaan aspal dan pengelupasan selimut aspal dari permukaan agregat. Jumlah rongga yang tersisa setelah beton aspal dipadatkan dapat menjadi indikator kededapan air. Tingkat impermeabilitas beton aspal berbanding terbalik dengan tingkat durabilitasnya.

C. Campuran Laston

Laston dikenal pula dengan nama AC (*Asphalt Concrete*), termasuk dalam perkerasan untuk jenis permukaan yang berkualitas tinggi, terdiri dari aspal

keras/cement (AC) dan agregat bergradasi menerus, dicampur pada *asphalt plant*, dihampar dan dipadatkan pada suhu tertentu.

Laston yang digunakan sebagai lapis permukaan berfungsi sebagai pelindung yang tahan terhadap cuaca, gaya geser, dan tekanan roda serta memberikan lapis kedap air yang dapat melindungi lapis dibawahnya dari rembesan air (Sukirman, 1999).

D. Bahan Penyusun Laston

Pada dasarnya, bahan penyusun dari suatu perkerasan lentur terdiri atas agregat kasar, agregat halus, filler dan bahan aditif. Namun, bahan-bahan yang akan digunakan tersebut, sebelumnya harus diuji sesuai standar dan memenuhi spesifikasi yang telah ditetapkan oleh Bina Marga. Hal tersebut dilakukan agar diperoleh perkerasan yang memiliki performa yang baik dan sesuai dengan umur rencana yang direncanakan.

1. Agregat

a. Umum

Menurut Sukirman (1999), agregat atau batuan merupakan komponen utama dari lapisan perkerasan jalan 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 material lain. Beberapa kriteria agregat untuk Laston, antara lain:

- i. Bergradasi baik atau rapat.
- ii. Memiliki nilai ketahanan yang tinggi, baik ketahanan terhadap aus dan gesek karena lalu lintas, maupun ketahanan terhadap kerusakan akibat pembekuan dan pencairan.
- iii. Permukaan yang kasar.
- iv. Berbentuk kubus.

iii. Permukaan yang kasar.

iv. Berbentuk kubus.

v. Bersifat *hydrophobic* (tidak menyerap air)

b. Agregat kasar

Parameter agregat kasar untuk campuran Laston harus terdiri dari batu pecah atau kerikil pecah yang bersih, kering, kuat, awet dan bebas dari bahan lain yang mengganggu seperti lumpur dan harus memenuhi spesifikasi seperti yang disyaratkan pada Tabel 2.1. Agregat yang digunakan harus dari sumber dan jenis yang sama untuk menjamin keseragaman campuran.

Tabel 2.1. Persyaratan agregat kasar

Pengujian	Standar	Nilai
Abrasi dengan mesin Los Angeles	SNI 03-2417-1991	Maks. 40%
Kelekatan agregat terhadap aspal	SNI 03-2439-1991	Min. 95%
Penyerapan air	SNI 03-1969-1990	Maks. 3%
Berat jenis semu	SNI 03-1969-1990	Min. 2,5%

Sumber : SNI 03-1737-1989

c. Agregat Halus

Agregat halus yang digunakan untuk campuran aspal harus bersih, kering, kuat, bebas dari gumpalan-gumpalan lempung dan bahan-bahan lain yang mengganggu serta terdiri dari butir-butir yang bersudut tajam dan mempunyai permukaan yang kasar. Spesifikasi untuk agregat halus dapat dilihat dari Tabel 2.2.

Tabel 2.2. Persyaratan agregat halus

Pengujian	Standar	Nilai
Penyerapan air	SNI 03-1970-1990	Maks. 3%
Berat jenis semu	SNI 03-1970-1990	Min. 2,5%

Sumber : SNI 03-1737-1989

d. *Filler*

Filler merupakan bahan pengisi pada campuran (*void in mix*), berbutir halus yang lolos saringan No.30 dan lolos saringan No.200 dengan persentase minimal 70 %. *Filler* berfungsi untuk mengurangi kepekaan terhadap temperatur serta mengurangi jumlah rongga udara dalam campuran.

e. Gradasi Agregat Gabungan

Agregat gabungan yang akan digunakan harus sesuai dengan Revisi SNI 03-1737-1989. Gradasi agregat gabungan untuk campuran Laston-WC yang disyaratkan dapat dilihat pada Tabel 2.3.

Tabel 2.3. Gradasi agregat campuran untuk campuran Laston-WC

Ukuran Ayakan		% Berat Yang Lolos terhadap Total Agregat dalam Campuran Laston(AC)
inchi	mm	<i>Wearing Coarse (WC)</i>
1 ½	37,5	
1	25	
¾	19	100
½	12,5	90 - 100
⅜	9,5	Mak. 90
No. 4	4,75	43 - 63
No. 8	2,36	28 - 39,1
No. 16	1,18	19 - 25,6
No. 30	0,6	13 - 19,1
No. 50	0,3	9 - 15,5
No. 100	0,15	6 - 13
No. 200	0,075	4 - 10

Sumber: R SNI 03-1737-1989

2. Aspal

Aspal merupakan senyawa hidrokarbon berwarna hitam atau coklat tua, yang dibentuk dari unsur-unsur *asphaltiness*, *resin* dan *oils*. Hidrokarbon adalah bahan dasar utama dari aspal yang disebut bitumen, sehingga aspal sering juga disebut bitumen.

Aspal yang digunakan pada konstruksi perkerasan jalan menurut Sukirman (1999) berfungsi sebagai:

a. Bahan pengikat, memberikan ikatan yang kuat antara aspal dan agregat dan antara aspal itu sendiri.

b. Bahan pengisi, mengisi rongga antara butir-butir agregat dan pori-pori

Aspal untuk Lapis Aspal Beton harus terdiri dari salah satu aspal keras/*asphalt cement* penetrasi 60/70 atau 80/100 yang seragam, tidak mengandung air, bila dipanaskan sampai dengan 175°C tidak berbusa, dan memenuhi persyaratan seperti yang tercantum pada Tabel 2.4. Kadar aspal dalam campuran Laston merupakan perbandingan antara persentase berat aspal terhadap berat campuran yang berkisar antara 4 % sampai 7 %. Semakin banyak kadar aspal, kemampuan untuk saling mengikat antara agregat dan aspal akan semakin kuat sehingga mengurangi rongga dalam campuran tetapi juga dapat mengakibatkan terjadinya *bleeding* karena pada saat ada beban lalu lintas yang menambah pemadatan lapisan sehingga sebagian material lapisan aspal akan terpompa keluar (Sukirman, 1999).

Tabel 2.4. Persyaratan aspal keras

No	Jenis Pemeriksaan	Cara Pemeriksaan (SNI)	Persyaratan				Satuan
			Pen. 60		Pen. 80		
			Min	Mak	Min	Mak	
1	Penetrasi (25°C, 5 detik)	SNI 06-2456-1991	60	79	80	99	0,1 mm
2	Titik Lembek (ring ball)	SNI 06-2434-1991	48	58	46	54	°C
3	Titik Nyala (Clev.Open cup)	SNI 06-2433-1991	200	-	225	-	°C
4	Kehilangan Berat (163°C, 5 jam)	SNI 06-2440-1991	-	0,8	-	0,1	% berat
5	Daktilitas (25°C, 5 cm/menit)	SNI 06-2432-1991	100	-	100	-	cm
6	Berat Jenis (25°C)	SNI 06-2441-1991	1	-	1	-	gr/cc
7	Penetrasi setelah kehilangan berat	SNI 06-2456-1991	54	-	50	-	cm

E. Karakteristik Marshall Campuran Laston

Campuran Laston yang diuji Marshall harus memenuhi persyaratan yang telah ditentukan. Berdasarkan spesifikasi baru beton aspal campuran panas (2010) persyaratan campuran laston dapat dilihat pada Tabel 2.5.

Tabel 2.5. Ketentuan sifat-sifat campuran Laston

Sifat-Sifat Campuran		Nilai	Laston		
			WC	BC	Base
Penyerapan kadar aspal		Maks.	1,2 untuk Lalu Lintas > 1 juta ESA		
			1,7 untuk Lalu Lintas < 1 juta ESA		
Jumlah tumbukan per bidang			75		112
Rongga dalam campuran (VIM) (%)	Lalu Lintas (LL)	Min.	4,9		
	> 1 juta ESA	Maks.	5,9		
	> 0,5 Juta ESA &	Min.	3,9		
	< 1 juta ESA	Maks.	4,9		
	Lalu Lintas (LL)	Min.	3		
	< 0,5 juta ESA	Maks.	5		
Rongga dalam Agregat (VMA) (%)		Min.	15	14	13
Rongga terisi aspal (%)	Lalu Lintas (LL)	Min.	65	63	60
	> 1 juta ESA				
	> 0,5 Juta ESA &	Min.	68		
	< 1 juta ESA				
	Lalu Lintas (LL)	Min.	75		73
< 0,5 juta ESA					
Stabilitas Marshall (kg)		Min.	800		800
		Maks.	-		-
Kelelehan (mm)		Min.	2		2
		Maks.	-		-
Marshall Quotient (kg/mm)		Min.	200		200
Stabilitas Marshall Sisa setelah perendaman selama 24 jam, 60°C		Min.	85 untuk Lalu Lintas > 1 juta ESA		
			80 untuk Lalu Lintas < 1 juta ESA		

F. Kepadatan Campuran

Pemadatan campuran Laston (*Asphalt Concrete*) pada perkerasan lentur mempunyai peran yang sangat penting terutama dalam kemampuan bekerja dari perkerasan ini. Properti campuran seperti rongga udara sangat tergantung pada tingkat dan metode pemadatan yang digunakan karena berpengaruh terhadap indikator kemampuan layanan perkerasan seperti terjadinya alur dan keausan yang menyebabkan retak-retak (Khan dkk., 1998).

Nilai kepadatan dipengaruhi oleh beberapa faktor seperti gradasi campuran, jenis dan kualitas bahan penyusun, faktor pemadatan termasuk jumlah pemadatan dan temperatur pemadatan, kandungan aspal dan penggunaan bahan *additive* dalam campuran. Menurut penelitian yang dilakukan oleh Khan dkk. (1998) yang membandingkan pemadatan AC di laboratorium untuk simulasi pemadatan lapangan, metode Marshall dengan pemadatan manual secara konsisten memberikan benda uji yang dipadatkan nilai stabilitas yang lebih tinggi daripada pengujian dengan menggunakan *Automatic Marshall Compactor*. Hal ini disebabkan aksi pemadatan yang diberikan oleh operator mesin pemadat tidak selalu jatuh pada porsi yang sama pada benda uji sehingga menyebabkan partikel agregat dapat tersusun ulang setelah penumbuk manualnya diangkat.

Campuran dengan nilai kepadatan yang tinggi akan mampu menahan beban lebih besar dibanding dengan campuran yang memiliki nilai kepadatan rendah, karena butiran agregat mempunyai bidang kontak yang luas sehingga gaya gesek (*friction*) antar butiran agregat menjadi besar dan menunjukkan bahwa kerapatan dengan nilai kepadatan tinggi akan semakin baik. Selain itu kepadatan juga mempengaruhi nilai impermeabilitas campuran, semakin tinggi nilai kepadatan maka nilai impermeabilitas juga akan semakin baik atau semakin kedap terhadap air dan udara (Januardi, 2013).

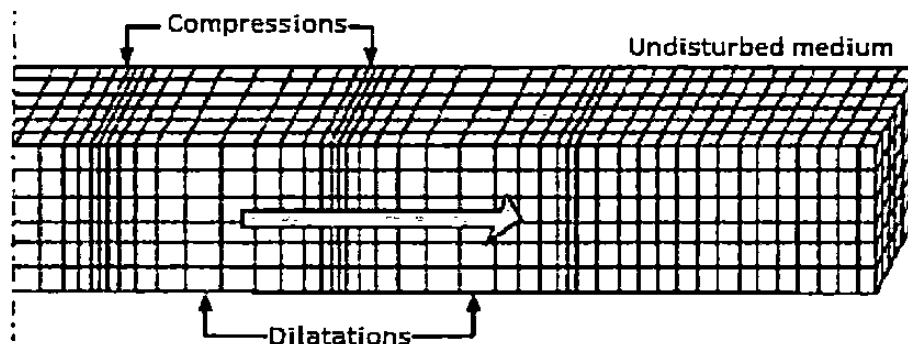
G. Gelombang Mekanik

Gelombang mekanik adalah getaran yang merambat pada suatu medium dengan tidak disertai perubahan bagian-bagian medium itu sendiri. Dalam perambatannya gelombang memindahkan energi dari suatu tempat ke tempat lain.

Gelombang mekanik secara khusus dapat didefinisikan sebagai gelombang yang secara alamiah akan dihasilkan apabila suatu sumber mekanik, misalnya pusat gempa, palu, berat penjatuh dan pergerakan tanah dibangkitkan atau diberikan pada suatu media padat. Gelombang mekanik terdiri atas dua jenis gelombang yaitu gelombang tubuh (primer dan geser) dan gelombang permukaan *Rayleigh*. Gelombang tubuh (primer) adalah yang tercepat diikuti oleh gelombang geser dan kemudian gelombang permukaan *Rayleigh* dan *Love* (Sack dkk., 1995).

1. Gelombang P (Primer)

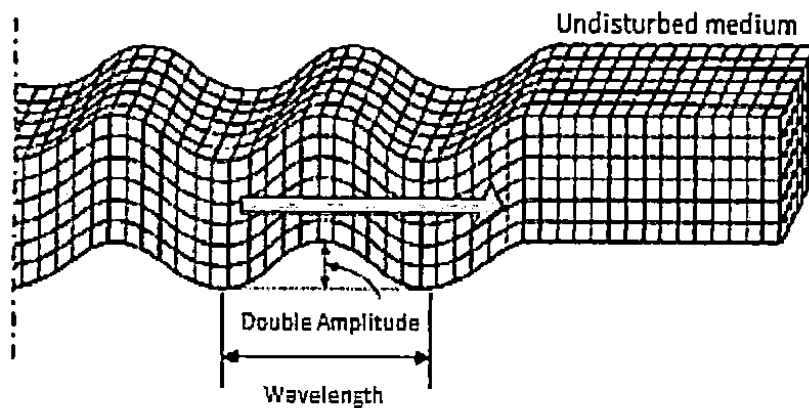
Gelombang P merupakan gelombang yang merambat secara longitudinal dari pusat gelombang yang gerakan partikelnya berjalan secara menerus sejajar dengan arah perjalanannya (Gambar 2.1). Gelombang P dapat merambat pada media yang padat maupun cair dengan kecepatan gelombang antara 1,4 sampai 6,4 km/detik (Tjokrodimulyo, 1995).



Gambar 2.1. Gelombang Primer (P) (Nazarian, 1984)

2. Gelombang S (Sekunder)

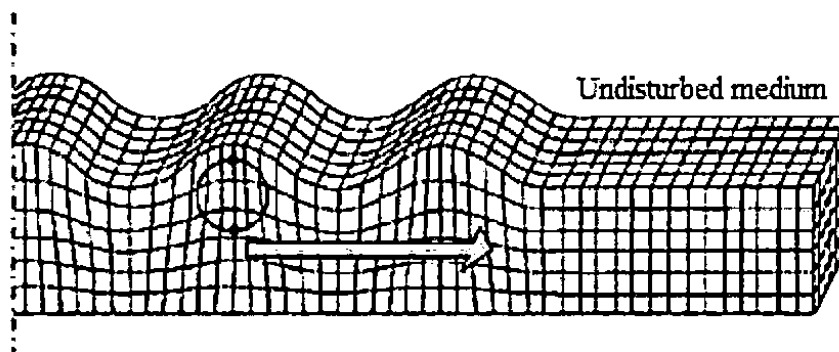
Gelombang S adalah gelombang sekunder atau bisa disebut juga dengan gelombang geser karena memiliki gaya geser dengan perambatan secara transversal (Gambar 2.2). Gelombang S dapat menyebabkan pergeseran pada material karena arahambatannya. Kecepatan gelombang S sekitar 2/3 kali



Gambar 2.2. Gelombang Geser (S) (Nazarian, 1984)

3. Gelombang R (*Rayleigh*)

Gelombang *Rayleigh* adalah gelombang yang partikel-partikelnya bergerak ke arah perambatan secara horizontal terhadap pergerakan gelombang dan terdapat gerakan berputar dalam permukaan vertikal yang tegak lurus terhadap arah perambatannya (Gambar 2.3). Kecepatan gelombang R akan terlihat konstan terhadap frekuensi gelombang yang diukur pada media yang homogen atau sama nilai kekakuannya. Gelombang permukaan *Rayleigh* memiliki 67 % dari energi yang dibangkitkan. Pergerakan gelombang *Rayleigh* berlaku secara menyebar (*dispersion*) yang merupakan suatu fenomena alami sebagai fungsi frekuensinya, sehingga sifat perambatan dan penetrasi gelombangnya pada suatu media dipengaruhi oleh panjang gelombang dan frekuensi.



Gambar 2.3. Gelombang *Rayleigh* (Nazarian, 1984)

H. Sejarah dan Perkembangan SASW Untuk Perkerasan Jalan

Pengujian tidak merusak atau *Non Destructive Test* (NDT) merupakan metode yang digunakan untuk menguji kualitas bahan yang akan digunakan berbagai

industri tanpa merusak material bahan tersebut. Dalam berbagai bidang, metode NDT ini telah berkembang sangat pesat. Salah satu pengujian NDT yang telah dikembangkan sejak tahun 1980 di *University of Texas at Austin*, Amerika Serikat adalah metode analisis spektrum gelombang permukaan atau *Spectral Analysis of Surface Wave* (SASW). Metode ini merupakan pengembangan teknologi dari metode keadaan mantap (*steady state method*) (Jones, 1958), yang memanfaatkan perambatan gelombang permukaan dari sumber mekanik buatan untuk menilai kecepatan gelombang *Rayleigh* yang merupakan representasi dari kekakuan (*stiffness*) suatu struktur. Nilai kekuatan struktur bahan (modulus bahan) seterusnya dapat ditentukan dari parameter kecepatan gelombang. Pengembangan SASW di Indonesia sangat berpotensi untuk dikembangkan, selain harga peralatannya yang relatif lebih murah dibandingkan dengan FWD, pemodelan untuk interpretasi data dapat menggunakan model dinamis perambatan gelombang sehingga hasil yang diperoleh lebih mendekati kepada kondisi sebenar perilaku gelombang pada bahan perkerasan di lapangan.

Menurut Rosyidi (2004), keunggulan dari metode SASW ini adalah sifat pengujiannya yang tidak memberikan sebaran kerusakan pada struktur, metode ini murah dalam pelaksanaannya dan cepat untuk proses analisis hasilnya. Metode SASW dimulai dari studi William (1981) dan Heisey (1982) yang mengembangkan metode pengukuran gelombang permukaan dengan menggunakan palu mekanik sebagai sumber pembangkit gelombang. Aplikasi yang pertamanya telah dilakukan oleh Nazarian dan Stokoe (1984) yang menjelaskan penggunaan SASW kepada analisis kekakuan tanah dan struktur timbunan jalan. Dalam studinya, hasil pengukuran SASW telah dibandingkan dengan pengujian *cross hole* dan mendapati hasil pengujian SASW memiliki ketepatan yang tinggi.

Penggunaan teknik SASW telah dibuktikan berhasil untuk beberapa pengujian lapangan diantaranya studi karakteristik fondasi bangunan (Madhus & Westerdhal, 1990; Stokoe dkk, 1994), pengukuran lapangan nilai kekakuan tanah (Matthew dkk, 1996), pendeteksian lapisan pada struktur beton semen (Cho

dkk., 2001) dan penilaian kepadatan suatu struktur tanah timbunan (Kim dkk, 2001).

Untuk validasi pengukuran SASW di perkerasan jalan, Rosyidi dkk. (2002, 2003, 2004) dan Rosyidi (2004) telah menjalankan pengujian lapangan pada tipe perkerasan lentur yang menghasilkan persamaan empiris dari hubungan kapasitas kekuatan tanah terhadap nilai dinamis bahan yang diukur melalui gelombang. Hasil kajiannya menunjukkan bahwa terdapat nilai korelasi positif yang tinggi antara hubungan nilai CBR terhadap nilai kecepatan gelombang geser dan modulus elastik bahan yang dihasilkan dari pengukuran SASW.

I. Fungsi Spektrum dalam SASW

Analisis spektrum dalam SASW merupakan hubungan antar sinyal masukan dan sinyal keluaran dalam suatu sistem linier. Melalui komponen ini seterusnya dilakukan operasi spektrum yang digunakan untuk analisis SASW antara lain spektrum tenaga auto (*auto power spectrum*), spektrum tenaga silang (*cross power spectrum*), fungsi pindahan (*transfer function*) dan fungsi keterkaitan (*coherence function*) (Istiawan, 2005).

Spektrum tenaga auto yang disimbolkan dengan $G_{xx}(f)$ merupakan hasil perkalian antara spektrum linier $S_x(f)$ dengan bilangan kompleks $S_x^*(f)$.

$$G_{xx}(f) = S_x(f) \cdot S_x^*(f) \quad (2.1)$$

dengan:

- $G_{xx}(f)$: spektrum tenaga auto (spektrum tenaga pindahan)
- $S_x(f)$: spektrum linier
- $S_x^*(f)$: bilangan kompleks

$S_x(f)$ adalah spektrum linier yang merupakan bentuk sederhana dari hasil keluaran fourier dari fungsi $x(t)$ dalam domain waktu. Spektrum ini merupakan fungsi kompleks yang dapat dipecahkan oleh bagian imajiner (*imaginary*) dan bagian

nyata (*real*) atau dengan nilai magnetude dan fase, secara matematik, persamaan spektrum linier dapat ditulis dalam bentuk:

$$S_x(f) = \int_{-\infty}^{\infty} x(t) \exp(-i2\pi nt) dt \quad (2.2)$$

Spektrum tenaga auto merupakan bentuk nyata dan fungsi positif yang dapat dinyatakan sebagai tenaga getaran dalam fungsi frekuensi gelombang yang dibangkitkan.

Selain itu, data dari analisis spektrum dapat digunakan untuk menentukan kecepatan gelombang geser (C_s). Dalam menentukan kecepatan gelombang geser digunakan metode inversi sederhana (*simple inversion method*). Dalam metode inversi sederhana, kecepatan gelombang geser diasumsikan bernilai 1,1 kali dari kecepatan gelombang *Rayleigh*, sedangkan kedalaman lapisan bernilai 0,33 kali panjang gelombangnya (Heisley dkk., 1982), yang dinyatakan sebagai berikut:

$$C_s = 1,1 C_R \quad (2.3)$$

$$H = 0,33 \lambda \quad (2.4)$$

dengan ,

C_s : kecepatan gelombang geser (m/detik)

C_R : kecepatan gelombang *Rayleigh* (m/detik)

H : kedalaman (m)

λ : panjang gelombang *Rayleigh* (m)

J. Analisis Data Seismik dengan *Fast Fourier Transform* (FFT)

Fourier Transform (FT) merupakan operasi matematik yang menguraikan suatu isyarat dalam komponen frekuensi yang telah digunakan secara meluas untuk penyelesaian masalah dalam bidang teknik dan fisik. Metode FT digunakan untuk mendapatkan komponen-komponen dari fungsi-fungsi waktu yang periodik. Metode FT telah dikembangkan ke dalam metode numerik yang memiliki kemampuan menghitung secara digital dan metode tersebut dikenal sebagai

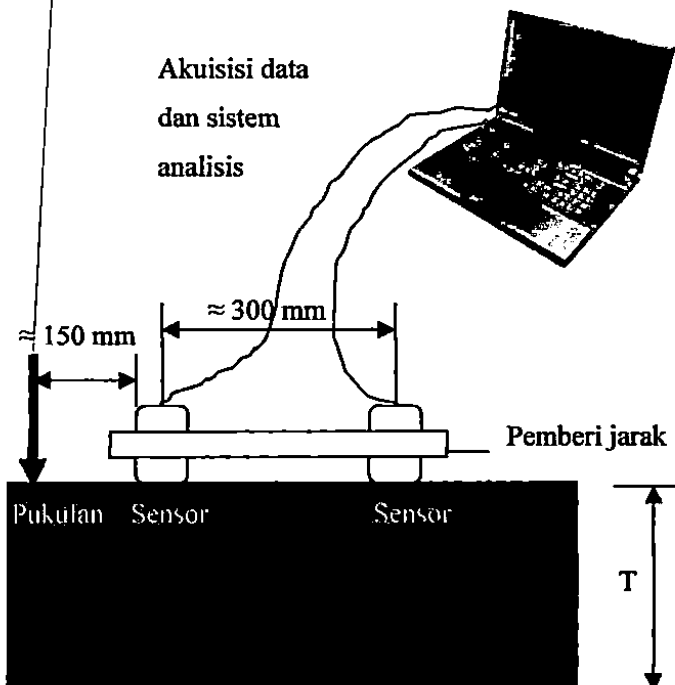
Penggunaan analisis data gelombang *Rayleigh* dari dalam bentuk waktu ke dalam bentuk frekuensi dan panjang gelombang memberikan beberapa manfaat yaitu penyelesaian persamaan perambatan gelombang dalam nilai frekuensi telah tersedia dan penggunaannya lebih mudah bagi analisis dalam parameter frekuensi dan panjang gelombang. Ini karena analisis dalam bentuk ruang dan waktu menggunakan algoritma yang lebih rumit (Ganji dkk., 1998). Kedua, analisis dalam bentuk frekuensi dan panjang gelombang mengandung data yang lebih lengkap mengenai perambatan gelombang (Bath, 1974).

K. Pengujian *Impact Echo* untuk Evaluasi Perkerasan

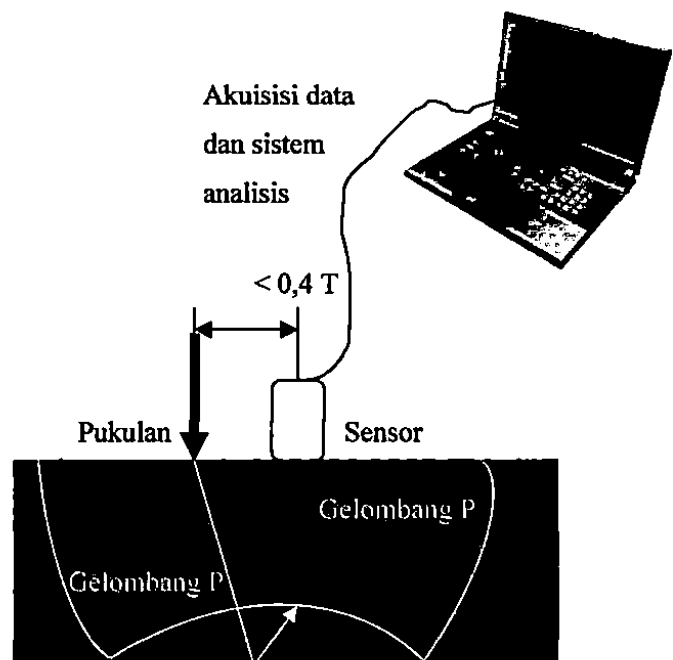
Dalam perencanaan perkerasan kaku, ketebalan dari slab beton adalah faktor utama yang mempengaruhi performa perkerasan tersebut. Beberapa alternatif pengujian tidak merusak telah dikembangkan untuk evaluasi perkerasan beton maupun bahan struktur lainnya dengan aplikasi dan keuntungan masing-masing. Salah satu metode yang digunakan yaitu metode *Impact Echo* (IE).

IE adalah salah satu metode NDT yang digunakan untuk mendeteksi cepat rambat gelombang pada material. Pada metode IE, evaluasi kondisi beton dilakukan dengan menggunakan gelombang mekanik yang berasal dari pukulan *impact* beban sehingga menyebabkan energi gelombang tekan yang melalui struktur merambat dan akan dipantulkan bila terdapat retak dan rongga (Cahyani dkk., 1995).

Berdasarkan ASTM C-1383, IE terdiri dari dua prosedur pengujian, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.4 dan 2.5



Gambar 2.4. Prosedur A



Gambar 2.5. Prosedur B

Berdasarkan Gambar 2.4, prosedur A merupakan pengukuran terhadap cepat rambat gelombang dengan mengukur cepat rambat gelombang primer pada material dengan menggunakan pukulan sesaat yang melihat waktu perambatan yang dibutuhkan gelombang primer tersebut pada suatu jarak tertentu. Cepat rambat gelombang ditentukan oleh jarak antara dua penerima gelombang dengan waktu tempuhnya sesuai dengan Persamaan (2.5).

$$C_p = \frac{L}{\Delta t} \quad (2.5)$$

dengan,

C_p = kecepatan gelombang primer (m/s)

L = tebal benda uji (m)

Δt = selisih waktu antara dua penerima gelombang (s)

Sesuai Gambar 2.5, prosedur B dilakukan untuk mengukur frekuensi yang terjadi akibat adanya gelombang primer. Gelombang yang terjadi akan dipantulkan pada sisi permukaan lainnya dari plat. Dengan asumsi bahwa sensor ditempatkan mendekati titik *impact*, total jarak dari gelombang yang dipantulkan ke lokasi sensor akan dua kali ketebalan. Durasi waktu kedatangan berturut-turut

gelombang primer sama dengan total jarak dibagi dengan kecepatan gelombang. Sehingga, frekuensi dari gelombang ditentukan dari kebalikan durasi waktu tersebut, sesuai dengan Persamaan (2.6).

$$f = \frac{C_{pp}}{2T} \quad (2.6)$$

dengan,

C_{pp} = kecepatan gelombang P (m/s)

T = kedalaman (m)

Persamaan 2.2 merupakan dasar perhitungan yang paling penting pada metode IE. Jika data gelombang yang diperoleh adalah data frekuensi, maka Persamaan (2.6) menjadi:

$$C_{pp} = f \times 2T \quad (2.7)$$

Kecepatan gelombang primer pada metode IE memiliki kisaran nilai yaitu 96 % dari kecepatan gelombang primer dalam media terbatas, sehingga untuk menghitung kecepatan gelombang dari metode permukaan yang diperkirakan menggunakan Persamaan 2.8.

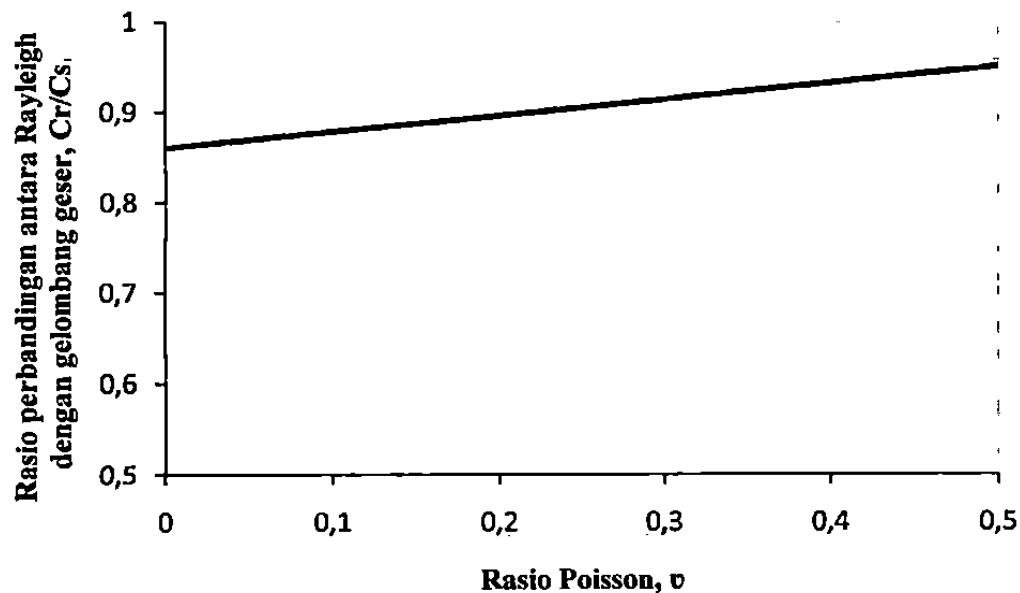
$$C_{pp} = 0,96 C_p \quad (2.8)$$

Kecepatan gelombang primer (C_p) dan kecepatan gelombang geser (C_s) secara teoritik saling berhubungan dengan angka poisson. Hubungan tersebut ditunjukkan dalam Persamaan (2.9)

- C_s = kecepatan gelombang geser (m/s)
 C_p = kecepatan gelombang primer (m/s)
 ν = *poisson's ratio*

Untuk lapisan dengan properti yang homogen, nilai kecepatan gelombang permukaan (C_r) dan kecepatan gelombang geser (C_s) juga berhubungan dengan angka poisson. Meskipun angka C_r dan C_s meningkat yang menyebabkan angka poisson meningkat, perubahan pada angka poisson adalah tidak signifikan untuk hubungan antara rasio Poisson dan rasio perbandingan antara C_r dan C_s , seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.6 (Nazarian, 1984). Persamaan (2.9) dapat ditulis sebagai berikut:

$$\nu = \frac{C_p^2 - 2C_s^2}{2(C_p^2 - C_s^2)} \quad (2.10)$$



Gambar 2.6 Hubungan teoritik elastik antara rasio poisson dengan rasio

L. Analisis Statistik

Analisis statistik dilakukan dua tahap uji antara lain uji korelasi *Product Moment* dan uji *T-student*. Uji korelasi bertujuan untuk mengetahui arah dan kekuatan hubungan antara dua data numerik yang berkaitan.

Untuk mengetahui korelasi pada uji parametrik digunakan Koefisien Korelasi Pearson (r) digunakan Persamaan (2.11).

$$r = \frac{n \sum XY - (\sum X)(\sum Y)}{\sqrt{[n \sum X^2 - (\sum X)^2][n \sum Y^2 - (\sum Y)^2]}} \quad (2.11)$$

dengan:

- n = banyaknya sampel
- X = variabel independen (prediktor)
- Y = variabel dependen (hasil)

Nilai “ r ” berkisar antara 0,0 yang berarti tidak ada korelasi, sampai dengan 1,0 yang berarti adanya korelasi yang sempurna. Semakin kecil nilai “ r ” semakin lemah korelasi, sebaliknya semakin besar nilai “ r ” semakin kuat korelasi. Berikut pembagian kekuatan korelasi menurut Colton (Malonda, 2011) :

1. $r = 0,00 - 0,25$ (tidak ada hubungan/hubungan lemah)
2. $r = 0,26 - 0,50$ (hubungan sedang)
3. $r = 0,51 - 0,75$ (hubungan kuat)
4. $r = 0,76 - 1,00$ (hubungan sangat kuat/sempurna)

Setelah dilakukan uji korelasi, hasil perhitungan (r) dapat dilakukan uji hipotesis menggunakan uji *T-student* menggunakan Persamaan (2.12). Kriteria penerimaan hipotesis memiliki dua arah hubungan dalam korelasi, yaitu :

1. Jika kenaikan variabel diikuti penurunan oleh variabel lain, maka terdapat korelasi negatif (H_0).

$$t = \frac{r\sqrt{(n-2)}}{\sqrt{(1-r^2)}} \quad (2.12)$$

dengan :

- t = penguji koefisien korelasi (t_{hitung})
- r = koefisien korelasi
- n = jumlah data

Hasil t_{hitung} kemudian dibandingkan dengan t_{tabel} dengan ketentuan bahwa:

1. H_0 diterima jika, $t_{hitung} \leq t_{tabel (\alpha, n-2)}$,
2. H_a diterima jika, $t_{hitung} > t_{tabel (\alpha, n-2)}$.

Nilai α merupakan tingkat kepercayaan yang diasumsi, kemudian digunakan untuk menentukan t_{tabel} dengan menggunakan nilai α dan nilai derajat kebebasan (dk) (Persamaan 2.13) sesuai Tabel *T-student* (Lampiran).

$$dk = n - 2 \quad (2.13)$$

dengan: