

BAB III

LANDASAN TEORI

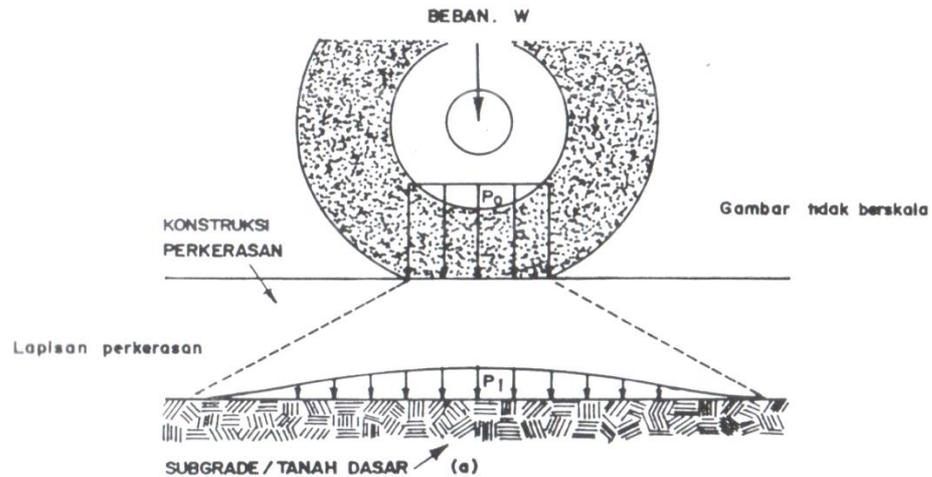
3.1 Perkerasan Jalan

Pekerasan merupakan lapisan perkerasan yang terletak dimana lapisan tanah dasar dan roda kendaraan, yang berfungsi memberikan pelayanan kepada sarana transportasi dan selama masa pelayanannya diharapkan tidak terjadi kerusakan yang berarti (Sukirman, 2003), Sukirman (1992) menyatakan bahwa berdasarkan bahan pengikatnya konstruksi perkerasan jalan dapat dibedakan menjadi tiga macam yaitu.

1. Konstruksi perkerasan lentur (*flexible pavement*).
2. Konstruksi perkerasan kaku (*rigid pavement*).
3. Konstruksi perkerasan komposit (*composite pavement*).

Oleh sebab itu perlu adanya perencanaan yang melihat dari beberapa faktor sehingga tidak dapat mempengaruhi kinerja perkerasan diantaranya yaitu umur rencana, lalu lintas yang merupakan beban perkerasan, kondisi lingkungan, tanah dasar, serta sifat dan mutu material yang tersedia.

Lapis permukaan harus mampu menahan beban yang berlebihan dan juga perubahan kondisi dan lingkungan di sekitarnya yang mengakibatkan lendutan pada lapis pondasi tanah dasar di bawahnya. Beban lalu lintas terkonsentrasi di permukaan kontak antara roda dan perkerasan, dengan tekanan kontak sekitar 400 KN/m². Dimana kemudian beban roda ini didistribusikan ke area permukaan tanah dasar yang lebih luas sehingga mereduksi tegangan maksimum pada tanah dasar, yaitu pada tekanan dimana tanah dasar tidak mengalami deformasi berlebihan selama masa pelayanan perkerasan. Terlihat pada Gambar 3.1



Gambar 3.1 Penyebaran Beban Roda Melalui Lapis Perkerasan Jalan

(Sumber : Sukirman, 1992)

Berikut adalah karakteristik perkerasan yang harus dimiliki oleh campuran aspal panas sebagai berikut.

1. Tahan terhadap tekanan (*stability*)

Kemampuan dari suatu perkerasan jalan menerima beban tanpa terjadi perubahan bentuk, seperti gelombang, alur dan *bleeding*. Kebutuhan sesuai jumlah lalu lintas dan beban kendaraan yang akan memakai jalan. Tidak boleh terlalu tinggi atau terlalu rendah yang dimana dapat menyebabkan terjadinya kerusakan seperti retak dan lain sebagainya. Oleh sebab itu untuk memiliki stabilitas yang tinggi dapat diperoleh dengan mengusahakan penggunaan sebagai berikut.

- a) Agregat dengan gradasi yang rapat (*dense graded*)
- b) Agregat dengan permukaan yang kasar
- c) Aspal dengan penetrasi rendah
- d) Aspal dalam jumlah yang mencukupi untuk ikatan dan butiran

2. Keawetan/daya tahan (*durability*)

Kemampuan aspal menerima repetisi beban lalu lintas seperti berat kendaraan dan gesekan antara roda kendaraan dan permukaan jalan, serta menahan keausan akibat pengaruh cuaca dan iklim, seperti udara, air atau perubahan

temperatur. Faktor yang mempengaruhi durabilitas lapisan perkerasan adalah sebagai berikut.

- a) *VITM (Voids in The Total Mix)* bernilai kecil agar lapis kedap air dan udara tidak masuk ke dalam campuran yang dapat membuat terjadinya oksidasi dan sehingga aspal menjadi rapuh (getas).
- b) *VMA (Void in Mineral Aggregate)* bernilai besar agar selimut aspal dapat dibuat tebal. Jika *VITM* dan *VMA* kecil serta kadar aspal tinggi maka dapat terjadi *bleeding* dan penurunan kinerja cukup besar. Untuk mencapai *VMA* yang besar ini dipergunakan agregat bergradasi senjang.
- c) Film (Selimut) aspal, film aspal tebal dapat menghasilkan berdurabilitas tinggi, tetapi kemungkinan potensi terjadinya *bleeding* menjadi besar.

3. Kelenturan (*fleksibility*)

Kemampuan lapisan perkerasan untuk dapat mengikuti deformasi yang terjadi akibat beban lalu lintas berulang, tanpa terjadinya retak dan perubahan volume. Untuk mendapatkan nilai fleksibilitas yang tinggi menggunakan cara sebagai berikut.

- a) Menggunakan agregat bergradasi senjang sehingga diperoleh *VMA* yang besar.
- b) Menggunakan aspal lunak (aspal dengan penetrasi yang tinggi).
- c) Menggunakan aspal yang cukup banyak sehingga diperoleh *VITM* yang kecil.

4. Kekesatan atau tahan gesek (*skid resistance*)

Kemampuan permukaan perkerasan terutama pada kondisi basah, yang mana mampu menahan gaya gesek pada roda kendaraan sehingga roda kendaraan tidak tergelincir, ataupun slip.

5. Ketahanan terhadap kelelahan (*fatigue resistance*)

Ketahanan dari lapis aspal dalam menerima beban berulang tanpa terjadinya kelelahan yang berupa alur (*rutting*) dan retak. Beberapa faktor yang mempengaruhi sebagai berikut.

- a) *VITM* yang tinggi dan kadar aspal yang rendah akan mengakibatkan kelelahan yang lebih cepat.

- b) *VMA* dan kadar aspal yang tinggi dapat mengakibatkan lapis perkerasan menjadi fleksibel.

6. Mudah dilaksanakan (*workability*)

Mudahnya suatu campuran untuk dihamparkan dan dipadatkan sehingga diperoleh hasil yang sesuai rencana dan memenuhi kepadatan yang dibutuhkan. Kemudahan pelaksanaan dipengaruhi oleh beberapa hal antara lain.

- a) Gradasi agregat baik lebih mudah dilaksanakan dari pada agregat bergradasi lain.
- b) Temperatur campuran yang mempengaruhi kekerasan bahan pengikat bersifat termoplastis.
- c) Kandungan *filler* (pengganti) atau *additive* (tambahan) yang tinggi menyebabkan pelaksanaan menjadi sulit.

3.2 Bahan Penyusun Perkerasan Lentur

Bahan penyusun lapis perkerasan lentur untuk lapis permukaan terdiri atas bahan ikat dan bahan pokok. Bahan ikat untuk perkerasan bisa berbeda-beda tergantung dari jenis perkerasan jalan yang akan dipakai. Bisa berupa tanah liat, aspal/*bitumen*, *portland cement*, atau kapur/*lime*. Sedangkan untuk bahan pokok sendiri berupa pasir, kerikil, batu pecah/agregat dan lain-lain.

3.2.1 Aspal/bitumen

Aspal adalah mineral perekat berwarna hitam atau coklat tua, pada temperatur ruang berbentuk padat sampai agak padat, dan bersifat termoplastis. Sifat termoplastis adalah jika dipanaskan sampai temperatur tertentu, aspal akan menjadi lunak/cair, sehingga dapat membungkus partikel agregat pada pembuatan aspal beton. Jika temperature menurun aspal akan mulai mengeras dan mengikat agregat pada tempatnya (Sukirman, 1992). Menurut *Colbert* (1984), aspal atau bitumen merupakan material yang berwarna hitam kecoklatan yang bersifat viskoelastis sehingga akan melunak dan mencair bila mendapat cukup pemanasan dan sebaliknya. Sifat viskoelastis inilah yang membuat aspal dapat menyelimuti dan menahan agregat tetap pada tempatnya selama proses produksi dan masa

pelayanannya. Aspal pada lapis perkerasan berfungsi sebagai bahan ikat antara agregat untuk membentuk suatu campuran yang kompak, sehingga akan memberikan kekuatan masing-masing agregat (*Kerbs dan Walker, 1971*).

Berdasarkan jenisnya aspal dibedakan menjadi 3, yaitu sebagai berikut.

1. Aspal keras (*asphalt cement*)

Aspal bersifat viskoelastis sehingga bila mendapatkan cukup pemanasan akan melunak dan mencair dan saat temperatur kamar berbentuk padat dan keras. Aspal yang dirancang dengan memilih nilai penetrasi, semakin rendah nilai penetrasi maka semakin keras aspal. Aspal yang biasa digunakan di Indonesia adalah aspal penetrasi 60/70 atau 80/100.

2. Aspal cair (*cut back asphalt*)

Campuran antara aspal keras dengan bahan pencair dari hasil penyulingan minyak bumi. Dalam temperatur ruang aspal ini berbentuk cair. Digunakan untuk keperluan lapis resap pengikat (*prime coat*).

3. Aspal emulsi

Campuran aspal dengan air dan bahan pengemulsi untuk memperlambat pemisahan. Aspal akan berubah warna dari coklat menjadi hitam saat proses mengeras (*break up*).

Menurut Totomidharjo (2000), ada dalam pemilihan aspal sebagai bahan ikat pada campuran panas (*hot mix*) harus memenuhi syarat, sebagai berikut.

1. *Stiffness* (kekakuan/kekerasan), aspal yang digunakan harus mempunyai kekerasan yang cukup yang berfungsi sebagai bahan jalan aspal.
2. *Workability* (mudah dikerjakan), sifat mudah dikerjakan saat pelaksanaan penggelaran dan memudahkan dalam pemadatan untuk memperoleh lapis perkerasan yang padat kompak.
3. *Tensile strength and adhesion* (kuat tarik dan adhesi), sifat kuat tarik dan adhesi diperlukan agar lapis perkerasan yang dibuat akan tahan terhadap kerusakan, jika sebagai berikut.
 - a. *Cracking* (retak), ditahan oleh kuat tarik.
 - b. *Fretting* (pengelupasan), ditahan oleh adhesi.
 - c. *Ravelling* (goyah), ditahan oleh kuat tarik dan adhesi.

4. Tahan terhadap cuaca merupakan ketahanan yang diperlukan agar perkerasan tetap memiliki konsistensi tahanan gesek (*skid resistance*).

Aspal yang digunakan harus memenuhi persyaratan seperti tercantum dalam Tabel 3.1.

Tabel 3.1 Persyaratan Aspal Keras AC 60/70

No.	Jenis Pengujian	Standar	Nilai Persyaratan
1.	Berat jenis	SNI-06-2441-1991	$\geq 1,0$
2.	Penetrasi pada 25 ⁰ C (0,1 mm)	SNI-06-2456-1991	60-70
3.	Daktilitas pada 25 ⁰ C (cm)	SNI-06-2432-1991	≥ 100
4.	Titik nyala (⁰ C)	SNI-06-2433-1991	≥ 232
5.	Kelarutan dalam TCE (%)	ASTM D5546	≥ 99
6.	Titik lembek (⁰ C)	SNI-06-2434-1991	≥ 48

Sumber : Bina Marga (2010)

3.2.2 Agregat

Agregat adalah sekumpulan butir-butir batu pecah, kerikil, pasir atau mineral lainnya, baik berupa hasil alam maupun buatan (Departemen Pekerjaan Umum pada Petunjuk Pelaksanaan Laston Untuk Jalan Raya SKBI-2.4.26.1987).

Fungsi dari agregat dalam campuran aspal adalah sebagai kerangka yang memberikan stabilitas campuran jika dilakukan dengan alat pemadat yang tepat. Agregat sebagai komponen utama atau kerangka dari lapisan perkeranan jalan yaitu mengandung 90%-95% agregat berdasarkan persentase berat atau 75%-85% agregat berdasarkan persentase volume (Sukirman, 2003).

Menurut Bina Marga (2002), agregat berdasarkan butirannya dibagi menjadi 3 macam, yaitu sebagai berikut.

1. Agregat kasar, adalah agregat dengan ukuran butiran lebih besar dari saringan No.4 (4,475 mm)
2. Agregat halus, adalah agregat dengan ukuran butiran lebih halus dari saringan No.4 (4,75 mm)
3. Bahan pengisi (*filler*), adalah bagian dari agregat halus yang minimum 75% lolos saringan No.200 (0,075 mm).

Pemilihan jenis agregat yang sesuai untuk digunakan pada konstruksi perkerasan dipengaruhi oleh beberapa faktor, yaitu gradasi, kekuatan, bentuk, butir,

tekstur permukaan, kelekatan terhadap aspal serta kebersihan dan sifat kimia. Jenis dan campuran agregat sangat mempengaruhi daya tahan atau stabilitas suatu perkerasan jalan (*Kerbs and Walker, 1971*).

Menurut Sukirman (1992), gradasi agregat diperoleh dari hasil analisa ayakan dengan menggunakan satu set ayakan dimana ayakan yang paling kasar diletakkan diatas dan yang paling halus diletakkan paling bawah. Gradasi agregat dapat dibedakan sebagai berikut.

1. Gradasi seragam (*uniform graded*)

Ukuran hampir sama/sejenis atau mengandung agregat halus yang sedikit jumlahnya sehingga tidak dapat mengisi rongga antar agregat. Gradasi seragam disebut juga gradasi terbuka. Agregat dengan gradasi seragam akan menghasilkan lapis perkerasan jalan dengan sifat permeabilitas tinggi, stabilitas kurang, berat volume kecil.

2. Gradasi rapat (*dense graded*)

Campuran agregat kasar dan halus dalam porsi yang berimbang, sehingga dinamakan juga agregat bergradasi baik (*well graded*). Campuran agregat yang bergradasi rapat atau baik mempunyai pori sedikit mudah dirapatkan, dan mempunyai stabilitas yang tinggi. Tingkat stabilitas ditentukan dari ukuran butir agregat terbesar yang ada.

3. Gradasi buruk (*poor graded*)

Gradasi buruk/jelek merupakan campuran yang tidak memenuhi dua kriteria diatas. Agregat yang bergradasi buruk yang umum digunakan untuk lapisan perkerasan lentur yaitu gradasi celah, yang merupakan campuran agregat dengan satu fraksi hilang. Agregat dengan gradasi senjang akan menghasilkan lapisan perkerasan yang mutunya terletak diantara kedua jenis diatas.

Agregat yang digunakan harus memenuhi persyaratan seperti tercantum dalam Tabel 3.2. dan Tabel 3.3.

Tabel 3.2 Persyaratan Pemeriksaan Agregat Kasar

No	Pengujian	Standar	Persyaratan
1	Kekekalan bentuk agregat terhadap larutan natrium dan magnesium sulfat	SNI 3407:2008	Maks. 12%
2	Berat Jenis	SNI 1969 : 2008	>2,5
3	Penyerapan agregat terhadap air	SNI 1969 : 2008	< 3%
4	Butir pecah pada agregat kasar	SNI 7619 : 2012	95/90*)
5	Abrasi dengan Mesin <i>Los Angeles</i>	Campuran AC bergradasi kasar	Maks. 30%
6		Semua jenis campuran aspal bergradasi lainnya	Maks. 40%
7	Partikel pipih dan lonjong	ASTM D4791 Perbandingan 1:5	Maks. 10%
8	Material lolos ayakan No. 200	SNI 03-4142-1996	Maks. 2%
9	Kelekatan agregat terhadap aspal	SNI 2349 : 2011	Min. 95%

Sumber : Bina Marga (2010)

Tabel 3.3 Persyaratan Pemeriksaan Agregat Halus

No	Jenis Pengujian	Standar	Persyaratan
1	Berat Jenis (%)	SNI 1970: 2008	>2,5
2	Penyerapan Agregat Terhadap Air (%)	SNI 1970: 2008	< 5
3	<i>Sand Equivalent</i> (%)	SNI 3423: 2008	>50
4	Nilai setara pasir	SNI 03-4428-1997	Min. 60%
5	Angularitas dengan uji kadar rongga	SNI 03-6877-2002	Min. 45
6	Kadar lempung	SNI 3423: 2008	Maks. 1%
7	Agregat lolos ayakan No.200	SNI ASTM C117: 2012	Maks. 10%

Sumber : Bina Marga (2010)

3.3 Bahan Tambah (*Additive*) Limbah Karet

Bahan tambah merupakan material selain agregat dan aspal yang dicampurkan dalam campuran perkerasan yang ditambahkan sebelum atau selama proses pemanasan aspal berlangsung. Bahan tambah digunakan untuk memodifikasi sifat dan karakteristik aspal. Misalnya untuk dapat dengan mudah dikerjakan serta penghematan energi.

Karet terdiri dari senyawa kimia yang disebut hidrokarbon. Hidrokarbon dari karet alam tersusun atas rantai-rantai panjang yang mengandung 1000-5000 unit isoprene. Rantai isoprene merupakan rantai (C₅H₈), susunan ruang demikian membuat karet mempunyai sifat kenyal (Stevens, 2001).

Penambahan bahan tambah seperti serbuk ban bekas ke dalam campuran aspal memberikan daya tahan yang lebih baik terhadap suhu tinggi maupun beban, dibandingkan dengan aspal tanpa penambahan bahan tambah. Penambahan bahan tambah pada aspal memberi indikasi untuk memperbaiki ketahanan geser pada suhu tinggi sehingga mencegah terjadinya kerusakan (Aprina, 2005).

Menurut Sugiyanto (2008) pengganti sebagian agregat pada fraksi No. 50 dengan serbuk ban bekas mampu menambah ketahanan campuran *hot rolled asphalt* terhadap air sehingga dapat mengurangi kerusakan jalan. Pada penelitian ini bahan tambah yang digunakan adalah serbuk ban bekas yang tertahan saringan No. 50.

3.4 Air Laut

Air laut adalah wilayah paling luas di permukaan bumi dan merupakan kumpulan air asin yang banyak dan luas yang memisahkan benua, pulau yang satu dengan yang lainnya. Secara umum keasaman air laut berkisar 8,2 sampai 8,4 dimana air sebanyak 96,5% dan material terlarut berupa molekul dan ion sebesar 3,5%. Material terlarut tersebut 89% terdiri dari garam Chlor sedangkan sisanya 11% merupakan unsur lain (Muaya, Kasake dan Manoppo, 2015)

Selain faktor air, faktor suhu juga berperan besar mempengaruhi perkerasan jalan beraspal panas. Dimana rata-rata suhu permukaan air laut di Indonesia sekitar 26°C-30°C menurut Muaya (2015). Beberapa sifat air laut yang agresif dan merusak, sebagai berikut.

1. Air laut merupakan elektrolit yang memiliki sifat konduktivitas tinggi.
2. Air laut mempunyai kandungan oksigen terlarut yang tinggi.
3. Temperatur permukaan air laut umumnya tinggi.
4. Ion klorida yang terkandung pada air laut merupakan ion agresif.

3.5 Superpave (*Super Performing Asphalt Pavement*)

Campuran *Superpave* adalah suatu campuran agregat dan aspal yang di campur dalam keadaan panas pada suhu dan komposisi tertentu. Dimana menetapkan gradasi target mempunyai ciri-ciri utama yaitu adanya titik kontrol (*control points*) yang berfungsi sebagai batas yang diijinkan untuk dapat dilewati

target gradasi dan daerah penolakan (*restricted zone*) adalah daerah tertentu yang tidak boleh dilewati oleh target gradasi, agar tidak menghasilkan suatu campuran yang mengalami masalah, dalam pelaksanaan proses pemadatan dan juga sensitif terhadap kadar aspal, mudah menjadi plastis dengan adanya sedikit perubahan kadar aspal (*hump gradation*). Persyaratan spesifikasi *Superpave* menentukan target gradasi dalam bentuk ukuran nominal untuk setiap desain lapisan pondasi, lapisan pengikat dan lapisan permukaan, maka dipilih kombinasi agregat yang sesuai spesifikasi *Superpave* pada Tabel 3.4, Tabel 3.5, dan Gambar 3.2 di bawah ini.

Tabel 3.4 Spesifikasi Gradasi Campuran *Superpave*

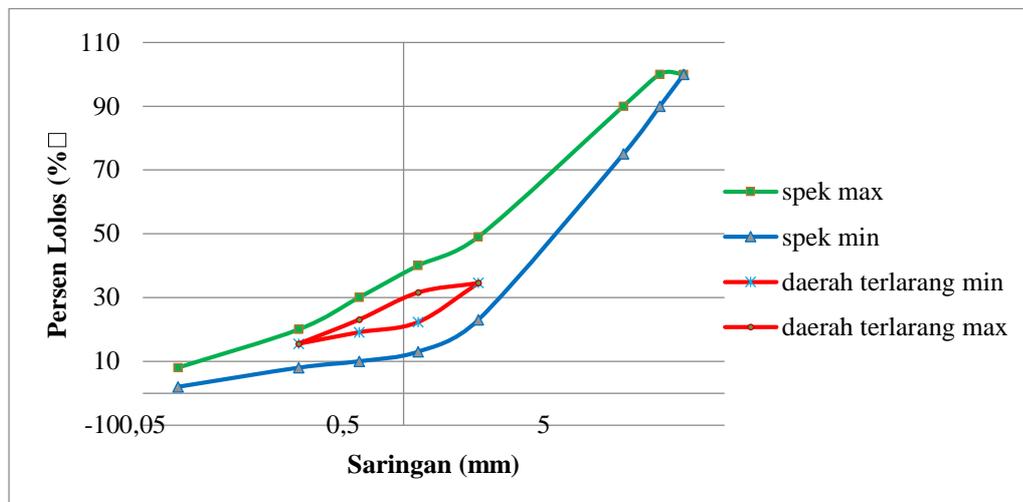
Standar Saringan (mm)	<i>Nominal Maximum Sieve Size</i>				
	9,5 mm	12,5 mm	19 mm	25 mm	37,5 mm
50					100
37,5				100	90-100
25			100	90-100	
19		100	90-100		
12	100	90-100			
9,5	90-100				
2,36	32-67	28-58	23-49	19-45	15-41
0,075	2-10,0	2-10,0	2,0-8,0	1,0-7,0	0,0-0,6

Sumber : SHRP A-407 (1994)

Tabel 3.5 Batas Daerah Larangan Campuran *Superpave*

Saringan	<i>Recommended Restricted Zone</i>				
4,75	47,2			39,5	34,7
2,36	31,6-37,6	39,1	34,6	26,8-30,8	23,3-27,3
1,18	23,5-27,5	25,6-31,6	22,3-31,6	22,3-28,3	15,5-27,3
0,6	23,5-27,5	19,1-23,1	19,1-23,1	16,7-20,7	11,7-15,7
0,3	18,7	15,2	15,5	13,7	10

Sumber : SHRP A-407 (1994)



Gambar 3.2 Spesifikasi Titik Kontrol dan Daerah Larangan Gradasi Superpave untuk Gradasi Agregat Ukuran 19 mm.

(Sumber: SHRP A-407, 1994)

Pada Gambar 3.2 di atas selain *restricted zone* dijelaskan juga mengenai *maximum density line*, *nominal maximum size* dan *maximum size*. Berikut ini penjelasan dari istilah tersebut.

1. *Maximum density line* adalah garis gradasi dimana kondisi campuran memiliki kepadatan maksimum dengan rongga diantara material agregat (VMA) yang minimum.
2. *Nominal maximum size* adalah ukuran saringan terbesar dimana agregat yang tertahan saringan tersebut tidak lebih dari 10%.
3. *Maximum size* adalah satu saringan yang lebih besar dari ukuran nominal maksimum dimana agregat yang lolos saringan sebanyak 100%.

3.6 Modifikasi Aspal

3.6.1 Aspal Modifikasi

Aspal modifikasi (*Polymer Modified Asphalt/PMA*, *Polymer Modified Bitumen/PMB*, Aspal Modifikasi) adalah aspal yang terbentuk dari proses pencampuran atau ditambahkan aspal dengan bahan tambah (*additive*). Bertujuan untuk meningkatkan kualitas aspal dan memberikan kemudahan (*workability*).

Banyaknya aspal dalam campuran perkerasan berkisar 4-10% berdasarkan berat campuran atau 10-15% berdasarkan volume campuran (Sukirman, 2003)

Penggunaan bahan tambah/adiktif dapat merubah sifat-sifat aspal, antara lain sebagai berikut.

- a. Membuat stabilitas meningkat
- b. Kepekaan terhadap suhu menjadi berkurang
- c. Ketahanan terhadap deformasi menjadi meningkat

Menurut Sheel Bitumen *handbook* (1990), agar modifier menjadi efektif, praktis dan ekonomis dalam penggunaannya maka modifier harus seperti berikut.

- a. Tersedia di lapangan
- b. Tahan terhadap degradasi pada suhu pencampuran
- c. Bercampur dengan aspal
- d. Meningkatkan ketahanan terhadap *flow* pada suhu tinggi sehingga tidak membuat aspal terlalu encer pada suhu pencampuran dan penghamburan atau tidak membuat aspal terlalu kaku atau rapuh pada suhu jalan yang rendah.
- e. Biayanya murah.

3.6.2 Modifikasi Aspal Dengan Limbah Ban Karet

Bahan adiktif aspal adalah suatu bahan yang dipakai untuk ditambahkan pada aspal. Umumnya penambahan bahan *polimer* (biasanya sekitar 2-6%) sudah dapat meningkatkan hasil ketahanan yang lebih baik terhadap deformasi, mengatasi keretakan dan meningkatkan ketahanan usang akibat umur, sehingga menghasilkan jalan yang lebih tahan lama dan dapat mengurangi biaya perawatan atau perbaikan. Modifikasi aspal ini sendiri dikembangkan selama beberapa dekade terakhir.

Penggunaan ban bekas sebagai bahan tambah (*additive*) aspal telah diteliti oleh *US Departemen of Transportation Highway Administration* di Amerika sejak tahun 1986. Hasilnya penggunaan parutan ban bekas mampu mereduksi kerusakan pada perkerasan lentur yang diakibatkan oleh faktor cuaca dan lalu lintas (Sugiyanto, 2008) dikutip dari (*AASHTO*, 1982).

Penggunaan parutan ban bekas sangat cocok digunakan pada daerah beriklim panas (Sugiyanto, 2008). *Road Reasearch Center, Ministry of Public Work*

di Kuwait menyatakan penambahan 2% latek dan 5% parutan ban bekas terhadap aspal dapat mencegah terjadinya retak-retak, *bleeding* dan memperkecil terjadinya pelepasan butir pada permukaan perkerasan lentur. Selain bermanfaat untuk mengurangi keretakan dan menambah daya tahan jalan raya, limbah ban karet juga bermanfaat untuk mengurangi jumlah limbah karet yang ada di lingkungan.

Apabila untuk membantu perlekatan/anti dari pengelupasan, dipandang perlu bahan tambah yang terbukti baik, dan harus ditambahkan ke dalam aspal serta diaduk secara merata sesuai dengan petunjuk yang diberikan oleh pabriknya sehingga diperoleh campuran yang seragam (Bina Marga, 1987).

Limbah karet yang diserut menjadi bubuk, merupakan campuran yang di anjurkan sesuai penelitian yang sebelumnya. Namun sampai saat ini belum ada alat yang dapat melarutkan bubuk ban bekas tersebut hingga tercampur secara merata sehingga tidak dapat mempengaruhi sifat dasar aspal kaku sendiri. Oleh karena itu perlu mengikuti persyaratan yang telah tercantum dalam Tabel 3.

Tabel 3.6 Persyaratan Aspal Modifikasi

No.	Jenis Pengujian	Nilai Persyaratan
1.	Penetrasi, 25 ⁰ C, 100 gr, 5 detik (mm)	min 50
2.	Titik lembek, 2 inch, 100 gr (⁰ C)	min 54
3.	Titik nyala, <i>Cleveland opencup</i> (⁰ C)	min 220
4.	Kehilangan berat, 135 ⁰ C, 5 hari (%)	max 1
5.	Kelarutan, karbon tetra klorida (%)	min 90
6.	Daktalitas, 25 ⁰ C, 5 cm per detik (cm)	min 50

Sumber : Bina Marga (2010)

3.7 Karakteristik *Marshall Test*

Percobaan *Marshall* dikembangkan oleh *Bruce Marshall*, seorang insinyur dibidang aspal bersama dengan *The Mississippi State Highway Departement*. Prosedur percobaan *Marshall* di Indonesia mengikuti SNI 06-2489. Tujuan dari pengujian *Marshall* adalah untuk mengukur ketahanan daya ikat/adhesi campuran beraspal. adapun beberapa parameter pengujian *Marshall Test* antara lain stabilitas (*stability*), kelelahan (*flow*), *MQ* (*marshall quotient*), *VITM* (*Void in the total mix*),

VFWA (*Void filled with asphalt*), VMA (*Void in mineral aggregate*) dan kepadatan (*density*).

3.7.1 Stabilitas (*Stability*)

Stabilitas adalah beban yang ditahan campuran aspal beton sampai terjadi kelelahan plastis. Naiknya stabilitas bersama dengan bertambahnya kadar aspal sampai batas tertentu (*optimum*) dan turun setelah melampaui batas *optimum*. Hal ini karena aspal sebagai bahan ikat antar agregat dan dapat menjadi pelicin setelah melebihi batas *optimum*. Menurut Sukirman (1992), stabilitas yang terlalu tinggi juga kurang baik mengingat perkerasan akan menjadi kaku dan bersifat getas.

Nilai stabilitas didapatkan dari pembacaan arloji stabilitas pada *Marshall Test*. Nilai stabilitas ini harus dikoreksi untuk memasukkan nilai kalibrasi *proving ring* alat dan koreksi ketebalan benda uji dengan bantuan tabel koreksi benda uji.

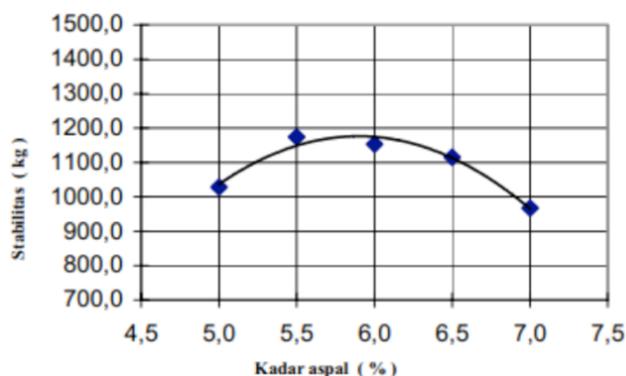
Nilai stabilitas dapat diperoleh dengan Persamaan 3.1, sedangkan grafik hubungan antara kadar aspal dan nilai stabilitas dapat dilihat pada Gambar 3.3. berikut (RSNI M-01-2003)

$$q = p \times s \quad (3.1)$$

Keterangan : q = angka stabilitas

p = pembacaan arloji stabilitas x kalibrasi alat

s = angka arloji koreksi benda uji



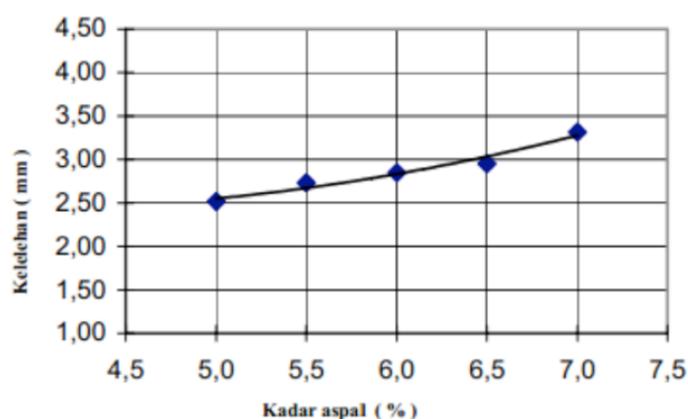
Gambar 3.3 Grafik Hubungan antara Kadar Aspal dan Nilai *Stability*

(Sumber : RSNI M-01-2003)

3.7.2 Kelelehan (*Flow*)

Kelelehan menunjukkan besarnya deformasi yang terjadi pada lapis keras akibat beban yang diterima. Nilai *flow* didapatkan dari pembacaan arloji *flow* saat *marshall test* berlangsung dalam satuan mm. Nilai *flow* banyak dipengaruhi oleh: viskositas, kadar aspal, gradasi agregat, permukaan agregat dan pemadatan.

Adapun grafik hubungan antara kadar aspal dengan nilai *flow* dapat dilihat pada Gambar 3.4 berikut (RSNI-M-01-2003)



Gambar 3.4 Grafik Hubungan antara Kadar Aspal dan Nilai *Flow*

(Sumber : RSNI M-01-2003)

3.7.3 *Marshall Quotient (MQ)*

MQ adalah perbandingan antara stabilitas dengan nilai *flow*. Uji ini digunakan sebagai pendekatan nilai fleksibilitas perkerasan. Semakin besar nilai *MQ*, maka campuran akan bersifat kaku dan sebaliknya semakin kecil nilai *MQ*, maka campuran akan bersifat lentur/plastis.

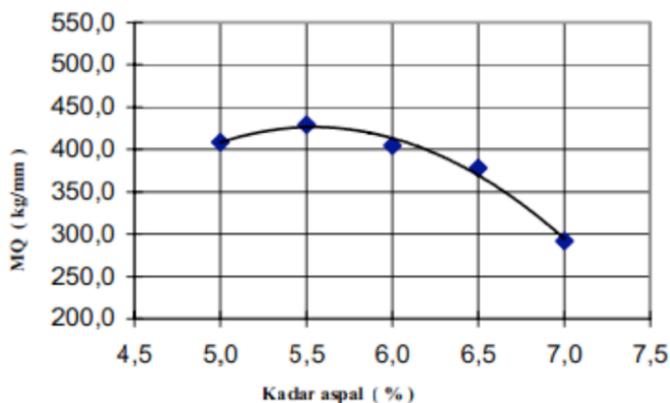
Nilai *MQ* dapat diperoleh dari Persamaan 3.2, sedangkan grafik hubungan antara kadar aspal dan nilai *MQ* dapat dilihat pada Gambar 3.5.

$$MQ = \frac{q}{r} \quad (3.2)$$

Keterangan : *MQ* = nilai *Marshall Quotient* (kg/mm)

q = nilai stabilitas (kg)

r = nilai *flow* (mm)



Gambar 3.5 Grafik Hubungan antara Kadar Aspal dan Nilai MQ

(Sumber : RSNI M-01-2003)

3.7.4 VITM (Void in the Total Mix)

VITM adalah persentase antara rongga udara dengan volume total campuran setelah dipadatkan. Nilai VITM akan semakin kecil jika kadar aspal semakin besar. Hal ini karena rongga antar agregat akan semakin terisi aspal. VITM yang semakin tinggi akan mengakibatkan kelelahan yang semakin cepat, berupa alur dan retak.

Nilai VITM dapat diperoleh dari Persamaan 3.3 dan 3.4, sedangkan grafik hubungan antara kadar aspal dan nilai VITM dapat dilihat pada Gambar 3.6.

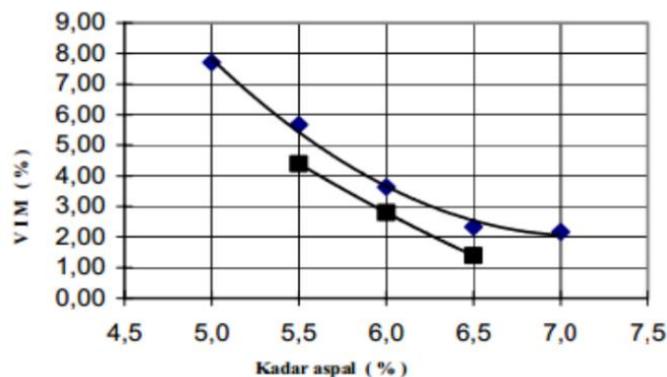
$$n = 100 - \left(100 - \frac{g}{h} \right) \quad (3.3)$$

$$h = 100 - \left(\frac{100}{\frac{\% \text{ Agregat}}{BJ \text{ Agregat}} + \frac{\% \text{ Aspal}}{BJ \text{ Aspal}}} \right) \quad (3.4)$$

Keterangan : n = nilai VITM (Void in the Total Mix)

g = berat isi sampel (gr/cc)

h = berat jenis maksimum teoritis campuran



Gambar 3.6 Grafik Hubungan antara Kadar Aspal dan Nilai *VITM*

(Sumber : RSNI M-01-2003)

3.7.5 *VFWA (Void Filled With Asphalt)*

VFWA yaitu persentase rongga dalam campuran yang terisi aspal yang nilainya akan naik berdasarkan naiknya kadar aspal sampai batas tertentu, dimana rongga telah penuh (optimum). Semakin besar nilai *VFWA*, maka semakin banyak aspal yang terisi di dalam rongga, sehingga keendapan campuran terhadap air dan udara semakin besar juga. Sebaliknya semakin kecil nilai *VFWA*, maka keendapan perkerasan terhadap air dan udara akan semakin kecil juga, sehingga akan mudah teroksidasi dan keawetan akan berkurang.

Nilai rongga aspal terisi aspal terlalu tinggi dapat menyebabkan naiknya aspal ke permukaan saat suhu perkerasan tinggi, sedangkan nilai *VFWA* yang terlalu rendah berarti campuran bersifat mudah teroksidasi.

Nilai *VFWA* dapat diperoleh dari Persamaan 3.5 sampai 3.6, sedangkan grafik hubungan antara kadar aspal dan nilai *VFWA*, dilihat pada Gambar 3.7.

1. Persentasi aspal terhadap campuran.

$$b = \left(\frac{a}{100+a} \right) \times 100 \quad (3.5)$$

Keterangan : a = Persentasi aspal terhadap agregat

b = Persentasi aspal terhadap campuran

2. Persentasi aspal terhadap agregat

$$m = 100 \times \frac{i}{l} \quad (3.6)$$

$$i = \frac{b \times g}{BJ \text{ Aspal}} \quad (3.7)$$

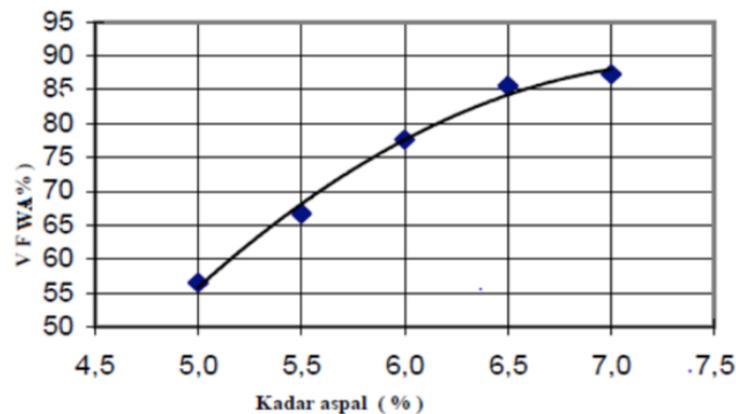
$$l = 100 - j \quad (3.8)$$

$$j = \left(\frac{(100-b) \times g}{BJ \text{ Agregat}} \right) \quad (3.9)$$

Keterangan : m = nilai *VFWA (Void Filled With Asphalt)* (%)

g = berat isi sampel (gr/cc)

b = persentase aspal terhadap campuran



Gambar 3.7 Grafik Hubungan antara Kadar Aspal dan Nilai VFWA

(Sumber : RSNI M-01-2003)

3.7.6 VMA (Void in Mineral Agregate)

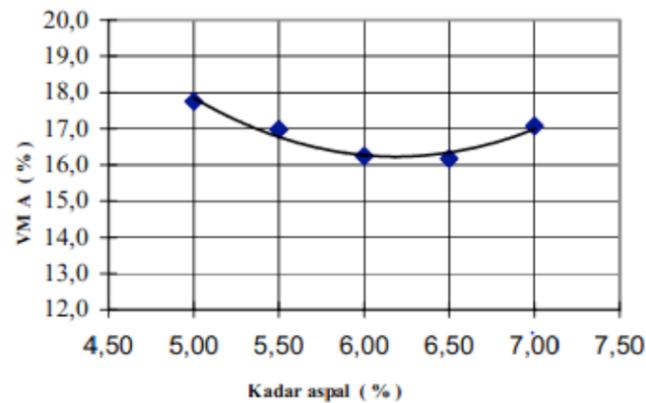
Nilai *VMA* merupakan rongga udara antar butiran agregat dalam campuran aspal padat, termasuk rongga udara dan kadar aspal efektif dinyatakan dalam persen terhadap campuran. Nilai rongga dalam mineral agregat pada umumnya mengalami penurunan hingga maksimum kemudian meningkat seiring bertambahnya kadar aspal.

Nilai *VMA* dapat diperoleh dari Persamaan 3.10 dan 3.11, sedangkan grafik hubungan antara kadar aspal dan nilai *VMA* dapat dilihat pada Gambar 3.8.

$$l = 100 - j \quad (3.10)$$

$$j = \left(\frac{(100-b) \times g}{BJ \text{ Agregat}} \right) \quad (3.11)$$

Keterangan : m = nilai *VMA (Void in Mineral Aggregate)* (%)
 g = berat isi sampel (gr/cc)
 b = persentase aspal terhadap campuran



Gambar 3.8 Grafik Hubungan antara Kadar Aspal dan Nilai VMA

(Sumber : RSNI M-01-2003)

3.7.8 Kepadatan (*Density*)

Density menunjukkan besarnya kepadatan suatu campuran yang telah dipadatkan. Semakin besar nilai *density*, maka kerapatannya semakin baik. Dengan semakin meningkatnya kadar aspal, jumlah aspal yang dapat mengisi rongga antara butir semakin besar, sehingga campuran menjadi semakin rapat padat. *Density* dipengaruhi oleh beberapa faktor, antara lain: gradasi bahan, jumlah pemadatan, temperatur pemadatan, dan kadar aspal.

Nilai *Density* dapat diperoleh dari Persamaan 3.12 dan 3.13, sedangkan grafik hubungan antara kadar aspal dan nilai *Density*, dilihat pada Gambar 3.9.

$$g = \left(\frac{c}{f} \right) \quad (3.12)$$

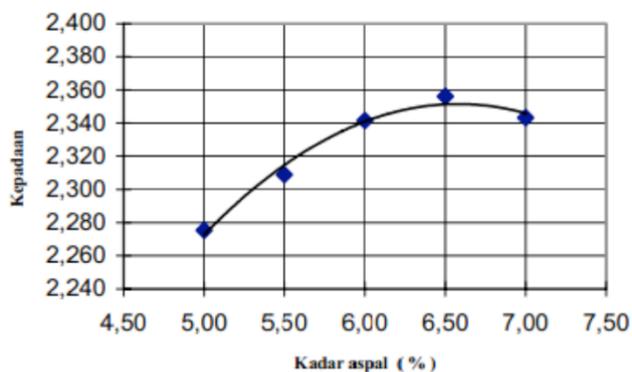
$$f = d - e \quad (3.13)$$

Keterangan : g = nilai Kepadatan (*Density*) (gr/cc)
 c = berat benda uji sebelum direndam (gr)

d = berat benda uji dalam keadaan jenuh / SSD (gr)

e = berat dalam air (gr)

f = volume/isi (cm³)



Gambar 3.9 Grafik Hubungan antara Kadar Aspal dan Nilai *Density*

(Sumber : RSNI M-01-2003)

3.8 Pengujian *Immersion Test (IRS)*

Immersion test adalah pengujian campuran aspal yang bertujuan untuk mengetahui perubahan karakteristik dari campuran akibat dari perubahan air, suhu, dan cuaca. Pada prinsipnya pengujian *immersion test* sama dengan pengujian *marshall test*, yang membedakan waktu perendaman saja. Menurut AASHTO 165-74 atau ASTM D.1075-54 (1969) ada dua metode uji perendaman *Marshall* (*immersion test*) yaitu uji perendaman selama 4×24 jam dengan suhu $\pm 50^{\circ}\text{C}$ dan uji perendaman selama 1×24 jam dengan suhu $\pm 60^{\circ}\text{C}$. Pada penelitian ini dipakai metode uji perendaman (*Marshall*) selama 24 jam dan suhu konstan 60°C sebelum pembebanan diberikan.

Hasil perhitungan indeks tahanan campuran aspal (*Index of Retained Strength*) adalah persentase nilai stabilitas campuran yang direndam selama 0,5 jam dan 24 jam (S_2) yang dibandingkan dengan stabilitas campuran biasa (S_1). Seperti tercantum pada Persamaan 3.14.

$$\text{Index of Retained Strength} = \frac{S_2}{S_1} \times 100\% \quad (3.14)$$

Keterangan : S_1 = stabilitas setelah direndam selama 0,5 jam

S_2 = stabilitas setelah direndam selama 24 jam

Apabila indeks tahanan campuran lebih atau sama dengan 90% memenuhi spesifikasi Bina Marga 2010. Campuran tersebut dapat dikatakan memiliki tahanan yang cukup baik dari kerusakan akibat pengaruh air, suhu, dan cuaca.

3.9 Pengujian *Indirect Tensile Strength (ITS)*

Metode pengujian untuk mengetahui nilai gaya tarik dari campuran aspal. kemampuan material dalam menerima gaya tarik, dalam hal ini menggunakan alat *Indirect Tensile Strength*. Untuk mengetahui apakah material mempunyai kemampuan gaya tekan besar dan mempunyai kemampuan memikul gaya tarik besar juga, maka terlebih dahulu harus mengetahui korelasi antara nilai *Marshall* dan *Indirect Tensile Strength*.

Menurut Kennedy (1997), alasan utama kemudahan dalam pengujian *Indirect Tensile Strength* yaitu sebagai berikut.

1. Pengujian ini relatif sederhana.
2. Tipe sempel dan peralatan yang digunakan sama dengan sampel dan peralatan untuk pengujian lainnya.
3. Kerusakan tidak dipengaruhi oleh kondisi permukaan.

Menurut *BSI (British Standart, 2003)*, langkah untuk menentukan *Indirect Tensile Strengt Test* adalah sebagai berikut.

1. Memastikan beban dan benda uji sejajar selama pengujian.
2. Menentukan tinggi dan diameter benda uji.
3. Memastikan tempat untuk menguji benda uji suhunya tetap pada suhu 25°C.
4. Menurunkan beban dari tempatnya.
5. Melakukan pengawasan terhadap perubahan bentuk dan menentukan beban vertikal dari kerusakan benda uji.

Indirect Tensile Strength Test adalah kuat tarik maksimum dihitung dari puncak beban. Seperti yang tercantum pada Persamaan 3.15 di bawah ini.

$$ITS = \frac{P_{runtu h}}{h} \times A_o \quad (3.15)$$

Keterangan : *ITS* = kuat tarik tidak langsung (kg/cm)

- P_{runtuh} = beban puncak (kg)
 h = tinggi sampel (cm)
 A_0 = konstanta

3.10 Pengujian Permeabilitas

Permeabilitas yaitu kemampuan atau kerapatan pada suatu campuran aspal untuk dapat ditembus oleh air. Pergerakan air di dalam perkerasan mengakibatkan kelemahan pada struktur atau kegagalan dari perkerasan, sehingga konstruksinya relatif rendah pada batas durabilitasnya. Nilai koefisien permeabilitas dapat dihitung menggunakan Persamaan 3.16.

$$K = \frac{V \times L \times \gamma_{air}}{P \times A \times T} \quad (3.16)$$

- Keterangan :
- K = koefisien permeabilitas (cm/detik)
 - V = volume rembesan (cm³)
 - γ_{air} = berat jenis air (dyne/cm³)
 - L = tinggi sampel (cm)
 - T = lama waktu rembesan (detik)
 - P = tekanan air (kgcm/det²/cm²)
 - A = luas penampang sampel (cm²)

Menurut Mullen (1967) dalam Emrizal (2009), berdasarkan koefisien permeabilitas, campuran aspal dapat diklasifikasi berdasarkan tingkat permeabilitas yang berbeda Tabel 3.7 di bawah ini.

Tabel 3.7 Persyaratan Aspal Modifikasi

K (cm/detik)	Permeabilitas
1 x 10 ⁻⁸	Kedap
1 x 10 ⁻⁶	Hampir Kedap
1 x 10 ⁻⁴	Drainasi Jelek
1 x 10 ⁻²	Drainasi Sedang
1 x 10 ⁻¹	Drainasi Baik

Sumber : Mullen (2006) dalam Emrizal (2009)

3.11 Pengujian *Cantabro Test*

Pengujian yang dilakukan untuk mengetahui ketahanan benda uji terhadap keausan dengan menggunakan mesin *Los Angeles*. Pengujian ini bertujuan untuk mengetahui kehilangan berat dari benda uji setelah dilakukan tes abrasi. Benda uji yang didiamkan selama 48 jam pada suhu ruang dan minimal 6 (enam) jam sebelum pengujian suhu harus dijaga berada pada suhu ruang, sebelum benda uji dimasukkan kedalam drum mesin *Los Angeles*. Sebelum dimasukkan terlebih dahulu ditimbang untuk mendapatkan nilai berat sebelum diabrasi (M_o). Setelah itu benda uji dimasukkan ke drum mesin *Los Angeles* tanpa bola baja. Kemudian dijalankan dengan kecepatan 30-33 tpm sebanyak 300 putaran. Kemudian setelah itu ditimbang kembali untuk mendapatkan nilai berat setelah diabrasi (M_i).

Nilai karakteristik *Cantabro Test* dapat dihitung dengan menggunakan Persamaan 3.17 berikut ini.

$$L = \frac{M_o - M_i}{M_o} \times 100 \quad (3.17)$$

Keterangan : L = persentase kehilangan berat (%)
 M_o = berat sebelum diabrasi (gr)
 M_i = berat setelah diabrasi (gr)

3.12 Analisis Statistik

Statistik merupakan cabang dari ilmu matematika yang mempelajari pengumpulan, pengorganisasian, pengolahan, penyajian dan analisis data serta menyimpulkan hasil. Sehingga diperoleh keputusan yang dapat diterima.

Pada penelitian ini, penelitian menggunakan analisis statistik *Anova* satu arah (*One Way Anova*). Analisis ini digunakan untuk membandingkan perbedaan rata-rata dari dua atau lebih kelompok data untuk suatu kategori berbeda. Data yang akan dianalisis terdiri dari satu variabel terikat dan satu variabel bebas. Berikut asumsi dasar yang harus terpenuhi dalam analisis *Anova* adalah sebagai berikut.

1. Kenormalan

Distribusi data harus normal, agar data terdistribusi normal dapat ditempuh dengan cara memperbanyak jumlah sampel dalam kelompok.

2. Kesamaan variasi

Bila banyaknya sampel sama pada tiap kelompok maka kesamaan variansinya dapat diabaikan, tetapi jika banyaknya sampel pada tiap kelompok berbeda maka kesamaan variasi populasi sangat diperlukan.

Pada analisis statistik *Anova* satu arah diperlukan adanya rumusan hipotesis. Hipotesis tersebut terdiri atas sebagai berikut.

$$H_0 : \mu_1 = \mu_2 = \mu_3 = \dots \mu_k \quad (3.18)$$

$$H_1 : \mu_1 \neq \mu_2 \neq \mu_3 \neq \dots \neq \mu_k \quad (3.19)$$

ada perbedaan antara sebelum dan setelah adanya perlakuan.

Penarikan kesimpulan dengan statistik *Anova* satu arah dapat dilakukan dengan cara berikut.

1. Membandingkan antara nilai t-hitung dengan nilai t-tabel

Besarnya nilai α yang sering digunakan dalam penelitian adalah 5% atau 0,05.

Bandingkan nilai t-hitung dengan t-tabel yang telah diperoleh.

Jika nilai F-hitung $>$ F-tabel ; maka H_0 ditolak.

Jika nilai F-hitung $<$ F-tabel ; maka H_0 diterima.

2. Menggunakan nilai signifikan atau *P-Value*

Jika nilai signifikan atau *P-Value* $>$ 0,05 ; maka H_0 diterima.

Jika nilai signifikan atau *P-Value* $<$ 0,05 ; maka H_0 ditolak.

3. Keputusan.

4. Pasca *Anova* (jika ada).

5. Kesimpulan.

Analisis setelah *Anova* atau pasca *Anova* (*post hoc*) dilakukan apabila hipotesis nol (H_0) ditolak. Fungsi analisis setelah *anova* adalah untuk mencari kelompok mana yang berbeda. Hal ini ditunjukkan oleh F hitung yang menunjukkan adanya perbedaan. Apabila F hitung menunjukkan tidak ada perbedaan, tentu analisis setelah *Anova* tidak perlu dilakukan. Pada penelitian ini analisis yang digunakan pasca *Anova* adalah *Tukey*.