

2 TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Perkerasan Jalan

Perkerasan aspal dan perkerasan beton aspal (*asphalt concrete pavement*), juga disebut tambalan fleksibel. Ini adalah campuran kerikil, pasir dan pengisi dan aspal peregangan dan kompres. *Paving fleksible* dirancang untuk melentur dengan *undercarriage* dan kembali ke posisi semula. Konsep dasar dari desain ini adalah untuk mendistribusikan lapisan permukaan dan pondasi di sepanjang lapisan di antaranya untuk mengontrol beban tanah dasar dan mencegah defleksi permanen. Jenis dan ketebalan komponen jalan yang ditempatkan di lapisan tanah harus dipilih dan kekuatan lapisan tanah harus dipertimbangkan. *Pavers* aspal dan beton aspal (juga dikenal sebagai *pavers fleksible*) adalah campuran yang tersebar dan dipadatkan dari batu pecah, pasir, pengisi, dan aspal.

Menurut Syarifin (2021), Kaca bekas menggantikan agregat halus dalam campuran aspal Ruston AC-BC (*Asphalt Concrete – Bonded Course*) Campuran *Hot Mix Asphalt* (HMA) membutuhkan agregat sebagai bahan penyusunnya. Agregat biasanya diperoleh dari alam dengan ketersediaan yang terbatas, sehingga diperlukan langkah-langkah efisiensi atau alternatif bahan lain. *Scrap glass* (SC) merupakan material yang dapat digunakan sebagai alternatif pengganti agregat. Penggunaan LK (limbah kaca) sebagai pengganti agregat halus (AH) yang dibutuhkan dalam konstruksi perkerasan aspal bertujuan untuk mengurangi ketergantungan terhadap AH dan mengurangi jumlah LK. Penelitian ini bertujuan untuk menentukan formula mix design dengan mencari kadar aspal optimum (KAO) pada saat pencampuran Ruston AC-BC dan LK sebagai pengganti AH.

Namun dalam penelitian kali ini limbah kaca di inovasi sebagai material pengisi dalam campuran aspal ac-wc, limbah kaca yang sudah tidak terpakai di daur ulang menjadi material serbuk halus yang harus lolos saringan nomor 200 sebagai syarat utama untuk digunakan sebagai *filler* dalam campuran. Hal ini dilakukan sebagai upaya inovasi para akademisi dan engineer untuk menemukan bahan alternatif lain yang mampu dimanfaatkan sebagai bahan konstruksi dengan ketersediaannya yang melimpah.

2.2 Perkerasan Lentur

Perkerasan lentur adalah jenis perkerasan jalan modern yang terdiri dari beberapa lapis bahan perkerasan yaitu lapis permukaan (*surface layer*), lapis pondasi atas (*top base layer*), lapis pondasi bawah (*lower base layer*), dan lapis pondasi bawah (*sub base layer*). Struktur permukaan jalan terdiri dari campuran agregat dan aspal, dan secara fleksibel (*fleksibel*) mengikuti beban lalu lintas yang bekerja di atasnya. Agregat atau partikulat merupakan kumpulan partikel (disebut fraksi) dari batu pecah, kerikil, pasir, atau mineral lain yang merupakan produk alami atau buatan manusia. Perkerasan fleksibel mempunyai tiga fungsi, dan untuk mencapai fungsi tersebut secara efektif, diperlukan beberapa lapisan:

- Fungsi awal (yang terlihat) dari perkerasan lentur adalah untuk menyediakan permukaan yang aman, halus dan cukup tahan lama bagi lalu lintas yang diperkirakan akan menggunakannya, selama umur rencana.
- Fungsi utama yang kedua adalah untuk mendistribusikan beban dari ban kendaraan ke area yang lebih luas di bawahnya (tanah dasar – lihat nanti), sehingga tanah dasar tidak berubah bentuk akibat pembebanan yang berulang-ulang.
- Terakhir, penting untuk melindungi lapisan perkerasan bawah dan tanah dasar dari dampak melemahnya air.

2.3 Agregat

Umumnya didefinisikan sebagai kerak bumi yang keras dan padat. ASTM mendefinisikan agregat sebagai suatu material yang tersusun dari mineral-mineral padat dalam bentuk rumpun atau fragmen-fragmen besar. Agregat merupakan komponen utama lapisan perkerasan jalan yang mengandung agregat 90-95% menurut beratnya atau agregat 75-85% menurut volumenya. Oleh karena itu, kualitas perkerasan ditentukan oleh jenis agregat dan hasil pencampuran agregat dengan bahan lain (Sukirman, 2016).

- Ukuran butir > 40 mm disebut batu
- Ukuran butir 4,80 – 40,00 mm disebut Agregat Kasar/Kerikil/*Split*
- Ukuran butir \leq 4,80 mm Agregat Halus/Pasir

Agregat dengan ukuran butir < 1,20 mm sering disebut Pasir Halus, sedang jika ukuran butir < 0,075 mm disebut *Silt* (lumpur), dan disebut *Clay* (lempung) bila ukuran butirnya < 0,002 mm.

2.4 Sifat Agregat

Jenis dan kualitas agregat sangat menentukan kemampuannya dalam memikul beban lalu lintas. Lapisan permukaan yang secara langsung memikul beban lalu lintas dan menyalurkannya ke lapisan bawah membutuhkan agregat yang berkualitas baik dan berkarakteristik baik. Sifat agregat yang menentukan kualitas perkerasan dapat dibagi menjadi beberapa kelompok (Sukirman, 1999).

Sifat agregat yang mempengaruhi kinerja campuran aspal adalah:

- Ukuran butir
- Gradasi
- Kebersihan
- Kekerasan
- Bentuk partikel
- Tekstur permukaan
- Penyerapan
- Kelekatan terhadap aspal
- Bahan pengisi (*filler*)

a. Ukuran Butir

Ukuran agregat dalam campuran aspal terdistribusi dari besar ke kecil. Semakin besar ukuran agregat maksimum yang digunakan, semakin besar variasi ukuran dalam campuran. Ada dua istilah yang umum digunakan untuk ukuran partikel agregat ini :

- Ukuran maksimum. Ini didefinisikan sebagai ukuran layar terkecil yang melewati 100% dari agregasi.
- Ukuran nominal maksimum. Didefinisikan sebagai ukuran maksimal ayakan yang masih mengandung *oversize* hingga 10%. - Di bawah ini adalah perbedaan antara keduanya. Analisis saringan menunjukkan bahwa 100% lolos saringan 25 mm. Agregat kasar tertahan oleh saringan 19 mm. Dalam hal ini ukuran butir maksimum adalah 25 mm dan ukuran nominal maksimum adalah 19 mm.

Istilah lain yang umum digunakan untuk ukuran agregat adalah:

- Agregat kasar: agregat tertahan saringan no.8 (2,36 mm) dalam campuran aspal atau agregat tertahan saringan no.8. 4(4,76 mm) pada lapisan dasar. - Agregat halus: Agregat yang lolos saringan no.8 (2.36mm) dalam campuran aspal atau agregat yang melewati saringan no.8. 4 (4,76 mm) pada lapisan dasar. Modul: agregat *paving fleksibel*
- Mineral Pengisi : Persentase agregat halus yang lolos saringan. 200 (0,075 mm) Sedikitnya 75% dari total berat agregat. Abu Mineral: Persentase agregat halus yang lolos 100% melalui saringan No. 200 (0.075mm).
- Mineral pengisi dan mineral abu dapat terjadi secara alami atau dari proses penghancuran batu atau buatan manusia. Mineral ini penting untuk mendapatkan campuran yang padat, tahan lama, dan tahan air. Namun, bahkan sedikit kelebihan atau kekurangan mineral ini akan menyebabkan campuran menjadi terlalu kering atau terlalu basah. Perubahan sifat campuran ini dapat dicapai dengan sedikit mengubah jumlah atau jenis pengisi atau debu mineral yang digunakan hanya terjadi. Oleh karena itu, jenis dan jumlah pengisi mineral atau debu yang digunakan dalam campuran harus dikontrol dengan cermat.

b. Gradasi

Gradasi agregat adalah pembagian (distribusi) variasi ukuran butiran agregat yang dinyatakan sebagai persentase dari berat total. Semua spesifikasi perkerasan mensyaratkan partikel agregat berada dalam kisaran ukuran tertentu dan memiliki rasio tertentu untuk setiap ukuran partikel. Batas gradasi diperlukan sebagai batas toleransi untuk menunjukkan bahwa agregat yang terdiri dari butiran kasar, sedang dan halus dapat digunakan secara teknis dalam perbandingan tertentu. Jika kurva berada di ujung atas batas toleransi gradasi, ini disebut grit yang lebih halus, dan sebaliknya, kurva berada di bagian bawah grit yang lebih kasar dari yang seharusnya. Gradasi agregat mempengaruhi ukuran rongga dalam campuran dan menentukan kemampuan kerja (*workability*) dan stabilitas campuran. *Grading* agregat ditentukan dengan analisis saringan. Di sini, sampel agregat melewati serangkaian saringan yang diatur sedemikian rupa, dari besar ke kecil.

Tabel 2.1 Gradasi agregat campuran untuk AC-WC

Ukuran Ayakan		Kumulatif Berat Lolos Terhadap Total Agregat (%)	
ASTM	(mm)	Batas Bawah	Batas Atas
3/4"	19	100	100
1/2"	12,5	90	100
3/8"	9,5	77	90
No.4	4,75	53	69
No.8	2,36	33	53
No.16	1,18	21	40
No.30	0,6	14	30
No.50	0,3	9	22
No.100	0,15	6	15
No.200	0,075	8	9

(Sumber : Kementrian Pekerjaan Umum Direktorat Jendral Bina Marga,2018

Revisi III Divisi6)

Pengurutan seragam atau pengurutan terbuka. Ini adalah gradasi agregat dengan ukuran yang kira-kira sama.

- Gradasi homogen disebut juga *grading* terbuka karena hanya mengandung sedikit agregat halus dan memiliki banyak rongga/rongga antar agregat.
- Bergradasi padat.

Gradasi batuan di mana butiran berkisar dari batuan kasar hingga halus, juga disebut miring secara konsisten atau miring dengan baik.

- Kelas kesenjangan.jika ukuran agregat tidak sempurna, beberapa fraksi agregat hilang, atau gradasi agregat terdapat dalam jumlah yang sangat sedikit, gradasi tersebut disebut juga dengan gap sorting. Agregat butir *Split* memiliki kualitas antara kedua ukuran butir di atas.
- Peringkat rendah *Grade* buruk adalah campuran agregat yang tidak memenuhi dua kategori di atas. *Grading* ini sering disebut *gap grading* dan

menghasilkan lapisan perkerasan dengan kualitas sedang antara kedua tipe diatas.

c. Kebersihan Agregat

Spesifikasi biasanya mencakup persyaratan kebersihan bahan agregat. Ini berarti membatasi jenis dan jumlah material yang tidak diinginkan (vegetasi, partikel lunak, kotoran, dll.) di dalam atau di atas material agregat. Agregat kotor mempengaruhi kinerja perkerasan, termasuk berkurangnya ikatan antara aspal dan agregat yang disebabkan oleh kandungan liat yang tinggi dalam agregat

d. Kekerasan (*Toughness*)

Agregat yang digunakan harus kuat dan mampu menahan keausan dan kerusakan selama proses produksi dan operasi lapangan. Agregat yang digunakan untuk lapisan atas perkerasan harus lebih keras (lebih ulet) daripada agregat yang digunakan untuk lapisan dasar. Hal ini karena lapisan atas perkerasan menyerap dan menahan tekanan dan benturan dari beban lalu lintas terberat. Untuk itu kekuatan agregat terhadap beban merupakan syarat mutlak bagi agregat yang digunakan sebagai bahan jalan.

e. Bentuk Partikel Agregat

Bentuk partikel agregat dapat dikelompokkan sebagai berikut: melingkar (bulat), *elips* (persegi panjang), kuboid (kubik), datar (bersisik), dan tidak beraturan (*irregular*). Agregat memiliki berbagai bentuk partikel, dari bulat ke sudut, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.1.

Dikehendaki



Rounded



Irregular



Angular

Tidak Dikehendaki



Flaky



Elongated



Flaky & Elongated

Gambar 2. 1 Partikel Agregat

f. Tekstur Permukaan Agregat

Struktur permukaan yang diaglomerasi dapat dibedakan menjadi halus/halus, kasar, atau berpori. Selain memberikan sifat anti slip pada permukaan perkerasan, tekstur permukaan agregat (baik makro maupun mikro) merupakan faktor lain yang menentukan kekuatan, kemampuan kerja, dan daya tahan campuran aspal.

g. Daya Serap Agregat

Untuk agregat berpori, porositas agregat menentukan seberapa banyak cairan yang dapat ditahan agregat. Kemampuan agregat dalam menyerap air dan aspal merupakan informasi penting yang perlu diketahui dalam pembuatan campuran aspal. Jika agregat memiliki daya serap yang sangat tinggi, maka agregat akan terus menyerap aspal selama dan setelah dicampur dengan aspal di dalam *Asphalt Mixing Plant (AMP)*.

h. Kelekatan Terhadap Aspal

Daya lekat agregat pada aspal adalah kecenderungan agregat untuk menerima, menyerap dan menahan lapisan aspal. Daya rekat aspal terhadap agregat dipengaruhi oleh sifat air agregat tersebut. Agregat hidrofobik (yang membenci air) adalah agregat yang melekat dengan baik pada aspal. Contoh agregat tersebut adalah batugamping dan dolomit. Di sisi lain, agregat hidrofilik (suka air) memiliki daya rekat yang buruk terhadap aspal. Dengan demikian, agregat jenis ini cenderung mengalami delaminasi dari lapisan aspal saat terkena air. Kuarsit dan beberapa jenis granit adalah contoh agregat hidrofilik.

i. Bahan Pengisi (*Filler*)

Ini adalah campuran rongga butiran halus yang berukuran untuk melewati Saringan No.200. Kelebihan atau kekurangan mineral ini akan membuat campuran terlalu kering atau terlalu basah.

Tabel 2.2 Ketentuan Agregat Halus

Pengujian	Metode Pengujian	Nilai
Nilai Setara Pasir	SNI 03-4428-1997	Min 50%
Uji Kadar Rongga Tanpa Pemasatan	SNI 03-6877-2002	Min 45%
Gumpalan Lempung dan Butir-butir Mudah Pecah dalam Agregat	SNI 03-4141-1996	Maks 1%
Agregat Lolos Ayakan No.200	SNI ASTM C117 : 2012	Maks 10%

Tabel 2.3 Ketentuan *Filler*

Pengujian	Standart	Nilai
Material lolos saringan No.200	SNI 03-6723-2002	Min 75%

Bahan pengisi yang ditambahkan (*filler added*), untuk semen harus dalam rentang 1% sampai dengan 2% terhadap berat total agregat dan untuk bahan pengisi lainnya harus dalam rentang 1% sampai dengan 3% terhadap berat total agregat kecuali SMA. Khusus untuk SMA tidak boleh menggunakan semen.

(Sumber : Kementerian Pekerjaan Umum Direktorat Jendral Bina Marga, 2018 Revisi III Divisi 6)

Tabel 2.4 Ketentuan Agregat Kasar

Pengujian	Metode pengujian	Nilai
<i>Kekekalan untuk agregat terhadap larutan</i> (Natrium sulfat) (Magnesium sulfat)	SNI 3407-2008	Maks 12% Maks 18%

Pengujian	Metode pengujian	Nilai
<p>Abrasi dengan mesin <i>LosAngeles</i></p> <p>Campuran AC modifikasi dan SMA (100 putaran)</p> <p>Campuran AC modifikasi dan SMA (500 putaran)</p> <p>Semua jenis campuran beraspal bergradasi (100 putaran)</p> <p>Semua jenis campuran beraspal bergradasi (500 putaran)</p>	SNI 2417-2008	<p>Maks 6%</p> <p>Maks 30%</p> <p>Maks 8%</p> <p>Maks 40%</p>
Kelekatan agregat terhadap aspal	SNI 2439-2011	Maks 95%
<p>Butir pecah pada agregat kasar</p> <p>SMA</p> <p>Lainnya</p>	SNI 7619:2012	<p>100/90*)</p> <p>95/90*)</p>
<p>Partikel pipih dan lonjong</p> <p>SMA</p> <p>Lainnya</p>	<p>ASTM D4791- 10</p> <p>Perbandingan 1:5</p>	<p>Maks 5%</p> <p>Maks 10%</p>
Material lolos ayakan No.200	SNI ASTM C117:2012	Maks 1%

(Sumber : Kementerian Pekerjaan Umum Direktorat Jendral Bina Marga,2018
Revisi III Divisi6)

2.5 Campuran Gradasi Agregat AC-WC

Gradasi atau distribusi partikel berdasarkan ukuran agregat penting dalam menentukan karakteristik plak. Gradasi agregat menentukan ukuran rongga atau pori-pori yang muncul dalam campuran. Agregat yang dicampur dengan agregat dengan ukuran yang sama akan berlubang atau sangat berpori karena agregat yang lebih kecil tidak dapat mengisi rongga tersebut. Sebaliknya, jika campuran terdistribusi secara merata dari ukuran terkecil hingga terbesar, rongga dan pori-pori akan lebih sedikit. Hal ini dikarenakan rongga-rongga yang terbentuk dari susunan agregat besar diisi oleh agregat yang lebih kecil. (Supriadi, 2010)

Secara umum berdasarkan Spesifikasi Umum Bidang Jalan dan Jembatan, Tahun 2018, campuran beton aspal terdiri dari 3 lapisan, yaitu:

- Aspal beton - aus kursus (AC - WC) dengan ukuran butir maksimum inci atau 19 mm.
- *Asphalt Concrete - Binder Course* (AC - BC) dengan ukuran butir maksimum 1 inch atau 25,4 mm.
- Aspal beton - *base course* (AC - base), ukuran butir maksimum 3/2 atau 37,5 mm.

Grading batuan memiliki pengaruh yang berbeda terhadap beton aspal yang dihasilkan. Sifat-sifat tersebut membuat beton aspal lebih sensitif terhadap perubahan kadar aspal dalam perbandingan campuran. Prosedur penentuan *working mix (formula job mix)* dilakukan dengan tahapan sebagai berikut: Pengujian stabilitas *marshall* benda uji terhadap gradasi yang ditentukan, stabilitas residu *Marshall* hingga penentuan kadar aspal optimum. Selanjutnya persiapan spesimen untuk pengujian stabilitas *marshall* di laboratorium.

Sifat-sifat yang diperlukan dari beton aspal membuatnya sangat cocok untuk digunakan sebagai pelapis permukaan dalam konstruksi jalan. Itu harus memenuhi karakteristik teknis dan non-teknis. Artinya beton aspal harus dibuat dari bahan yang murah. memenuhi karakteristik tersebut. Karakteristik teknis yang memenuhi persyaratan (spesifikasi). Secara umum, karakteristik teknis beton aspal dalam desain adalah:

1. Stabilitas

Stabilitas adalah kemampuan suatu lapisan perkerasan untuk menyerap beban lalu lintas tanpa mengalami perubahan bentuk (deformasi) seperti gelombang, alur, atau *bleeds*. Kebutuhan akan stabilitas sebanding dengan volume lalu lintas dan beban kendaraan yang menggunakan jalan tersebut. Perkerasan dengan stabilitas tinggi diperlukan pada jalan dengan lalu lintas padat yang dilalui kendaraan besar. Stabilitas dihasilkan dari gesekan intergranular, meshing intergranular, dan kekuatan ikatan yang baik antara aspal dan agregat. Jika stabilitasnya terlalu tinggi, lapisan akan menjadi kaku dan rentan retak. Juga, kadar aspal yang lebih sedikit diperlukan karena volume antar agregat yang lebih sedikit. Akibatnya, lapisan aspal menjadi lebih tipis dan ikatan aspal menjadi lebih mudah terkelupas, sehingga menurunkan durabilitas

2. Keawetan (*Durability*)

Daya tahan adalah kemampuan aspal untuk menangani lalu lintas dan menahan beban untuk waktu yang lama (mewakili umur rencana) tanpa kerusakan. Oleh karena itu, campuran harus cukup kedap udara sehingga udara dan air tidak mudah masuk. Jika ruang pori besar, udara yang mengandung oksigen memasuki campuran, sehingga mengoksidasi campuran. Untuk alasan ini, lapisan film aspal yang menutupi partikel agregat harus relatif tebal. Daya tahan lapisan atas harus tahan terhadap keausan akibat cuaca, air dan perubahan suhu, atau dari gesekan kendaraan.

3. Kelenturan (*Flexibility*)

Fleksibilitas adalah kemampuan perkerasan untuk mengikuti (beradaptasi) deformasi yang disebabkan oleh beban lalu lintas berulang tanpa retak atau berubah volume.

4. Kekesatan (*Skid Resistance*)

Ketahanan slip adalah sifat kekasaran yang ditawarkan oleh bahan permukaan perkerasan yang membantu arus lalu lintas yang lewat tanpa tergelincir baik dalam kondisi hujan (basah) atau kering.

5. Kelelahan (*Fatigue Resistence*)

Ketahanan lelah adalah kemampuan lapisan aspal beton (AC) untuk menahan beban berat atau ringan yang berulang tanpa mengubah bentuk alur atau retakan.

6. Kemudahan Pengerjaan (*Workability*)

Workability adalah sifat ringan dari bahan paving yang harus disebar dan dipadatkan untuk menghasilkan hasil yang sesuai dengan kepadatan yang diharapkan.

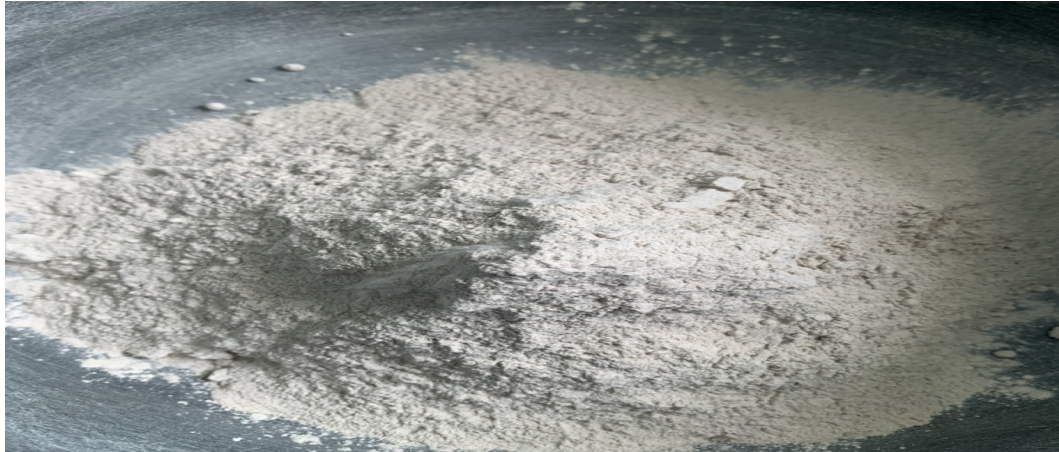
7. Kedap Air (*Impermeability*)

Impermeabilitas adalah kemampuan bahan paving untuk mencegah air menembus dengan mudah. Air dan udara dapat mempercepat proses penuaan campuran aspal- beton dan terlepasnya lapisan penutup aspal (film) dari permukaan agregat. Perkerasan dapat kedap air dengan mengurangi VIM, meningkatkan kadar aspal, dan menggunakan agregat bergradasi padat.

2.6 Kaca

Gelas adalah padatan *amorf* yang memiliki dua sifat umum. Pertama, kaca tidak memiliki rentang struktur atom biasa yang luas. Lalu kedua, dan yang paling penting, setiap gelas memiliki suatu fenomena sementara. Kaca terbuat dari bahan cair namun padat. Kaca jendela, lampu dan botol diklasifikasikan sebagai kaca silika (SiO_2), stabilizer lendir, magnesia (MgO), dll. Kaca paling umum terbuat dari silika (SiO_2). Ini adalah campuran batu pasir dan fluks yang menghasilkan viskositas dan titik leleh $1,580^\circ \text{C}$, lelehannya sangat kental dan karenanya sangat sulit untuk ditangani. Sifat kaca umumnya amorf dan padat, tetapi susunan atomnya seperti cairan, titik lelehnya tidak pasti, viskositasnya cukup tinggi, kuat terhadap reaksi kimia, insulasi yang dimiliki baik, dan kuat terhadap vakum. Saat tertiup angin akan rapuh. (Doremus, 1994) Sesuai Spesifikasi Umum 2018 yang mengisyaratkan penggunaan bahan anti pengelupasan dalam campuran beraspal, maka salah satu alternatif bahan anti-*stripping agent* yang dapat digunakan yaitu Limbah Kaca. Pemanfaatan limbah kaca ini, kemudian disamping mengatasi masalah pencemaran lingkungan dan juga dapat menjadi bahan tambah untuk peningkatan kinerja aspal. Limbah kaca yang telah dihaluskan merupakan bahan padat yang dapat digunakan sebagai bahan pengisi atau *filler*. Limbah Kaca

ini kemudian bertindak sebagai *anti-stripping agent* yang dapat meningkatkan durabilitas atau keawetan kinerja campuran beton aspal dalam 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



Gambar 2. 2 Limbah kaca yang telah di haluskan

2.7 Aspal

2.7.1 Pengertian Aspal

Aspal merupakan bahan termoplastik yang berbentuk padat atau agak padat pada suhu kamar/ruang. Aspal akan meleleh ketika dipanaskan sampai suhu tertentu dan membeku lagi ketika didinginkan. Bersama dengan agregat, aspal merupakan bahan pembentuk campuran permukaan jalan (Sukirman, 1999).

Aspal adalah bahan termoplastik yang menjadi lebih keras dan lebih kental ketika suhu turun dan melunak dan menjadi lebih cair ketika suhu naik. Sifat ini disebut sensitivitas suhu dan dapat memiliki nilai viskositas dan penetrasi yang sama pada suhu yang sama, tetapi dipengaruhi oleh komposisi kimia aspal. Bersama dengan agregat aspal merupakan bahan pembentuk campuran perkerasan jalan (Sukirman, 2016). Aspal yang digunakan dalam konstruksi jalan memiliki sifat fisik yang penting seperti konsistensi, daya tahan atau tahan cuaca, tingkat pengerasan, dan ketahanan terhadap pengaruh lingkungan air. Bersama agregat aspal merupakan material pembentuk campuran perkerasan jalan, banyaknya aspal dalam campuran berkisar antara sekitar 4% – 10% berdasarkan berat campuran atau sekitar 10% – 15% berdasarkan volume campuran Gambar 2.3 di bawah ini. (Sukirman, 2003)



Gambar 2. 3 Aspal

2.7.2 Fungsi Aspal

Aspal berfungsi sebagai pengikat material permukaan jalan dan agregat. Aspal bekerja seperti ini:

- a. Dari mengikat batu agar tidak meninggalkan jalan raya untuk lalu lintas (penyegelan, perlindungan terhadap erosi)
- b. Sebagai bahan pelapis dan perekat agregat.
- c. Primer adalah lapisan tipis aspal cair yang diaplikasikan pada lapisan dasar sebelum lapisan berikutnya.
- d. Lapisan primer adalah lapisan aspal cair yang diaplikasikan pada perkerasan sebelum lapisan berikutnya diaplikasikan, bertindak sebagai pengikat antara kedua lapisan tersebut.
- e. Sebagai pengisi butiran kasar, butiran halus, dan celah antar pengisi

Sifat-sifat Aspal Aspal dalam pekerjaan konstruksi jalan sebagai berikut:

1. Pengikat memberikan ikatan yang kuat antara aspal dan agregat dan antara aspal itu sendiri.
2. Bahan pengisi, yaitu mengisi rongga-rongga antara pori-pori partikel agregat yang ada dengan agregat itu sendiri, artinya harus mempunyai sifat-sifat.

2.7.3 Sifat-Sifat Aspal

a) *Durability*

Ketahanan aspal adalah kemampuan aspal untuk mempertahankan sifat aslinya melalui paparan cuaca selama masa layan jalan. Karena sifat ini adalah jenis campuran aspal, maka sifat ini tergantung pada jenis campuran agregat dengan aspal, faktor konversi, dll. Namun, properti ini dapat diekstrapolasi dari investigasi film tipis yang dipengaruhi cuaca selama masa pakai jalan. Karena sifat ini adalah jenis campuran aspal, maka sifat ini tergantung pada jenis campuran agregat dengan aspal, faktor konversi, dll. Namun, properti ini dapat diperkirakan dengan menggunakan studi *Thin Film Oven Test* (TFOT). (Riadi, 2019)

b) Adhesi dan kohesi

Daya lekat adalah kemampuan aspal untuk mengikat agregat sehingga membentuk ikatan yang baik antara aspal dan agregat. kohesi adalah Kemampuan aspal untuk menahan agregat pada tempatnya setelah mengeras. Telah ditemukan bahwa tiga faktor yang bertanggung jawab atas kegagalan beton aspal, termasuk hilangnya kohesi dalam aspal, penurunan kekuatan partikel agregat, dan rusaknya ikatan perekat antara agregat dan aspal [1]. Sifat kohesi pengikat aspal dan sifat adhesi aspal terhadap agregat (yaitu kekuatan ikatan) sangat bergantung pada komposisi kimia aspal dan agregat.

c) Kepekaan Terhadap Temperatur

Aspal adalah bahan termoplastik. Artinya, mengeras atau mengental saat suhu turun, dan melunak atau menjadi lebih cair saat suhu naik. Sifat ini disebut kepekaan terhadap perubahan suhu. Aspal memiliki jenis aspal yang sama, namun sensitivitas suhu setiap produksi aspal berbeda-beda antara aspal yang satu dengan yang lainnya.

d) Kekerasan Aspal

Pada proses pencampuran, aspal dipanaskan dan dicampur dengan agregat untuk melapisi agregat dengan aspal atau untuk menyemprotkan aspal panas pada permukaan agregat yang dihasilkan dalam proses peleburan. Selama reaksi, terjadi oksidasi dan aspal menjadi getas (viskositas meningkat). Peristiwa pelapukan akan terus berlanjut bahkan setelah periode pelaksanaan

berakhir. Oleh karena itu, selama masa pakainya, aspal mengalami oksidasi dan polimerisasi, yang besarnya juga dipengaruhi oleh ketebalan aspal yang menutupi agregat. Semakin tipis lapisan aspal maka semakin besar kegetasan yang terjadi. (Riadi, 2019)

Salah satu jenis aspal minyak adalah aspal keras/semen (AC). Semen aspal mengeras pada suhu kamar (25°C hingga 30°C). Ada beberapa jenis semen aspal, tergantung dari proses pembuatan dan area produksi minyak. Pengelompokan semen aspal dapat dilakukan dengan nilai penetrasi atau viskositas pada suhu 25°C . Di Indonesia, semen aspal biasanya dibedakan berdasarkan nilai penetrasinya.

- AC pen 40/50, yaitu AC dengan penetrasin 40-50.
- AC pen 60/70, yaitu AC dengan penetrasin 60-79.
- AC pen 80/100, yaitu AC dengan penetrasin 80-100.
- AC pen 200/300, yaitu AC dengan penetrasin 200-300.

Semen aspal permeabilitas rendah digunakan di iklim panas dan daerah lalu lintas tinggi, dan semen aspal permeabilitas tinggi digunakan di iklim dingin dan daerah lalu lintas rendah. Ini adalah semen aspal yang umum digunakan di Indonesia dengan permeabilitas 60/70 dan 80/100. Berikut adalah tabel semen aspal yang biasa digunakan di Indonesia dengan permeabilitas 60/70 serta 80/100.

Berdasarkan spesifikasi Kementerian Pekerjaan Umum Direktorat Jendral Bina Marga, 2018 (2018), setiap jenis perkerasan jalan memiliki ketebalan tersendiri yang ditujukan, pada Tabel 2.6 :

Tabel 2.5 Tebal Nominal Minimum Campuran Beraspal

Jenis Campuran (Laston)	Simbol	Tebal Nominal Maksimum
Lapis Aus	AC-WC	4.0
Lapis Antara	AC-BC	5.0
Lapis Pondasi	AC-Base	7.5

(Sumber : Kementerian Pekerjaan Umum Direktorat Jendral Bina Marga, 2018 Revisi III Divisi6)

Tabel 2.6 Ketentuan Sifat-sifat Campuran Laston (AC)

Sifat-sifat Campuran		Laston		
		Laston Aus	Lapis Antara	Pondasi
Jumlah tumbukan per bidang		75		112
Rasio partikel lolos ayakan 0,075 mm dengan kadar aspal efektif	Min	1,0		
	Maks	1,4		
Rongga dalam campuran (%)	Min	3,0		
	Maks	5,0		
Rongga dalam agregat (VMA) (%)	Min	15	14	13
Rongga terisi aspal (%)	Min	65	65	65
Stabilitas Marshall (Kg)	Min	800		1800
Pelelehan (mm)	Min	2		3
	Maks	4		6
Stabilitas Marshall sisa (%) setelah perendaman selama 24 jam, 60°C	Min	90		
Stabilitas dalam campurn (%) pada kepadatan membal (refusal)	Min	2		

(Sumber : Kementerian Pekerjaan Umum Direktorat Jendral Bina Marga, 2018 Revisi III Divisi6)

2.7.4 Pengujian Sifat Aspal

Pengujian sifat aspal perlu dilakukan untuk mengetahui dan menentukan sifat fisik dan kimiawi aspal sesuai dari tujuannya.

a. Pengujian Penetrasi

Pengujian ini bertujuan untuk mengetahui kekerasan aspal. Nilai penetrasi di dapat dari uji penetrasi dari alat penetrometer pada suhu 25° C dengan baban 100 gr selama 5 detik, dimana dilakukan sebanyak 5 kali.

b. Pengujian Titik Lembek

Tujuan dari pemeriksaan ini adalah untuk mengukur kepekaan aspal terhadap temperatur, dimana bola – bola baja mendesak turun lapisan aspal yang ada pada cincin, hingga aspal tersebut menyentuh dasar pelat yang terletak dibawah cincin pada jarak 1 (inchi), sebagai akibat dari percepatan pemanasan tertentu. Berat bola baja 3,45 - 3,55 gr dengan diameter 9,53 mm. Pemeriksaan ini diperlukan untuk mengetahui batas kekerasan aspal. Pengamatan titik lembek dimulai dari suhu 5° C sebagai batas paling tinggi sifat kekakuan dari aspal yang disebabkan oleh sifat termoplastik. Untuk aspal keras jenis penetrasi 60/70, syarat titik lembek berkisar antara 48° C – 58° C.

c. Pengujian Titik Nyala dan Titik Bakar

Pemeriksaan ini untuk menentukan suhu dimana diperoleh nyala pertama diatas permukaan aspal dan menentukan suhu dimana terjadi terbakarnya pertama kali diatas permukaan aspal. Dengan mengetahui nilai titik nyala dan titik bakar aspal, maka dapat diketahui suhu maksimum dalam memanaskan aspal sebelum terbakar. Pengujian ini menggunakan cawan cleveland diletakan di atas pelat pemanas dan letakan termometer pengukur suhu.

d. Pengujian Kehilangan Berat

Pemeriksaan ini berguna untuk mengetahui pengurangan berat akibat penguapan unsur-unsur aspal yang mudah menguap dalam aspal. Apabila aspal dipanaskan didalam oven pada suhu 163 °C dalam waktu 4,5 – 5 jam, maka akan terjadi reaksi terhadap unsur-unsur pada aspal, sehingga dimungkinkan sifat aspal akan berubah, ini tidak diharapkan pada lapis perkerasan lentur dengan menggunakan aspal, untuk itu dipersyaratkan kehilangan berat aspal maksimum adalah 0,8 % dari berat semula.

e. Pengujian Daktilitas Aspal

Tujuan dari pemeriksaan ini adalah untuk mengetahui sifat kohesi dan plastisitas aspal, pengujian dilakukan dengan menarik pada cetakan yang berisi aspal sebelum putus pada suhu 25° C dengan kecepatan tarik 5cm/menit. Besarnya daktilitas aspal penetrasi 60/70 disyaratkan minimal 100 cm.

f. Pemeriksaan Kelarutan dalam Carbon Tetra Clorida (CCl₄)

Pemeriksaan ini dilakukan untuk menentukan jumlah unsur aspal dalam CCl₄, dengan adanya bahan – bahan tidak terlarut dalam CCl₄ menunjukkan adanya bahan lain yang terlarut dalam residu aspal. Persyaratan dalam pemakaian aspal yang diinginkan adalah aspal dalam kondisi tidak tercampur dengan bahan – bahan lain yang tidak terlarut dalam CCl₄, untuk aspal penetrasi 60/70 disebutkan minimal sebesar 99 %.

g. Pemeriksaan Berat Jenis Aspal

Berat jenis aspal merupakan perbandingan antara berat aspal dengan berat air suling dengan volume yang sama. Persyaratan yang ditentukan untuk berat jenis aspal adalah 1 gr/cc.

h. Pemeriksaan Viskositas

Viskositas atau kekentalan. Tingkatan material aspal yang digunakan tergantung pada kekentalannya. Kekentalan aspal sangat bervariasi terhadap suhu, dari tingkatan padat, encer sampai tingkat cair. Kekentalan dinyatakan dalam satuan Pa detik atau poises (1 poise = 0,1 Pa detik). Viskositas kinematik dinyatakan dalam satuan cm²/detik dan stokes atau centistokes (1 stokes = 100 centistokes = 1 cm²/detik).

Tabel 2.7 Pengujian dan Persyaratan Aspal Keras Pen. 60/70

No	Jenis Pengujian	Metode Pengujian	Type I	Type II
			Aspal Pen.60-70	Aspal Modifikasi Elastomer
1	Penetrasi pada 25°C (0,1mm)	SNI 2456-2011	60-70	Min.40
2	Titik Lembek (°C)	SNI 2434:2011	≥48	≥ 54
3	Daktilitas pada 25°C, (cm)	SNI 2432:2011	≥100	≥100
4	Titik Nyala (°C)	SNI 2433:2011	≥232	≥232
5	Kelarutan dalam Trichloroethylene (%)	AASHTO T44-03	≥99	≥99
6	Berat Jenis	SNI 2441:2011	≥1,0	≥1,0
7	Berat yang Hilang (%)	SNI 06-2441-1991	≤0,8	≤0,8
8	Viskositas Kinematis 135 °C (cSt)	SNI 06-6441-2000	≥300	≤ 3000

2.7.5 Kandungan Aspal

Aspal atau bitumen adalah cairan kental yang merupakan senyawa hidrokarbon yang mengandung sejumlah kecil belerang, oksigen, dan klorin. Aspal sebagai pengikat jalan fleksibel memiliki sifat viskoelastik. Aspal padat pada suhu kamar dan menjadi cair ketika dipanaskan.

Komponen utama aspal adalah senyawa karbon alifatik dan aromatik jenuh dan tak jenuh dengan hingga 150 atom karbon per molekul. Atom selain hidrogen dan karbon yang menyusun aspal adalah nitrogen, oksigen, belerang, dan beberapa atom lainnya. Secara kuantitatif, massa aspal biasanya 80% karbon, 10% hidrogen, 6% belerang, sisa oksigen dan nitrogen, dengan jejak besi, nikel dan vanadium. Senyawa ini sering diklasifikasikan sebagai *asphaltenes* (berat molekul lebih rendah) dan *maltenes* (berat molekul lebih tinggi). Aspal biasanya mengandung 5-25% *asphaltenes*. Sebagian besar senyawa dalam aspal adalah senyawa polar. (DPU, 2022)

2.8 Faktor Yang Mempengaruhi Kadar Aspal Optimum

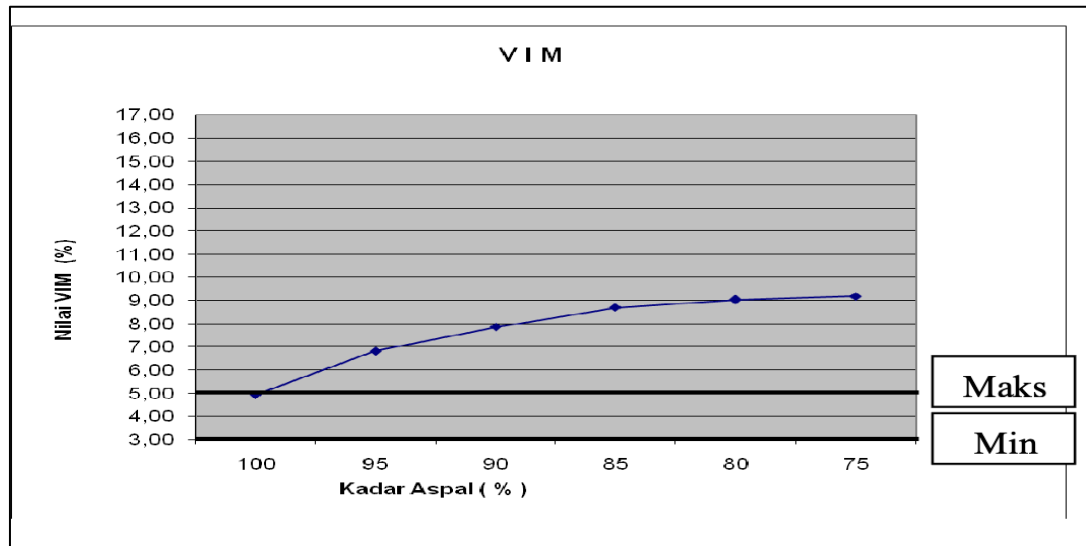
Aspal sebagai bahan pengikat dalam campuran beraspal pada sistem perkerasan lentur mempunyai pengaruh yang besar terhadap umur pelayanan lapis *perkerasan* jalan. Oleh sebab itu kadar aspal dalam suatu campuran aspal menjadi bagian yang sangat penting. Kadar aspal yang terpakai dalam campuran yang kemudian dihampar di lapangan adalah kadar aspal optimum. Kadar aspal optimum menjadi persyaratan mutlak dalam setiap campuran lapis perkerasan beraspal. Kadar aspal optimum pada campuran aspal harus memenuhi persyaratan spesifikasi, seperti nilai *Density*, VIM, VMA, VFB, Stabilitas, *Flow*, dan MQ.

2.8.1 *Density* (Berat isi/Kepadatan)

Nilai *density* menunjukkan besarnya kerapatan suatu campuran yang sudah dipadatkan. Faktor yang mempengaruhi *density* adalah temperatur pemadatan, gradasi, kadar *filler*, energi pemadat, kadar aspal, dan VMA. Agregat yang digunakan untuk membentuk beton aspal padat, memiliki gradasi tertentu yang biasanya diperoleh dari pencampuran beberapa fraksi agregat yang tersedia di lokasi. Masing-masing fraksi agregat mempunyai berat jenis yang berbeda, sehingga untuk menghitung berat beton aspal padat dibutuhkan berat jenis agregat campuran.

2.8.2 *Void In The Mix* (VIM)

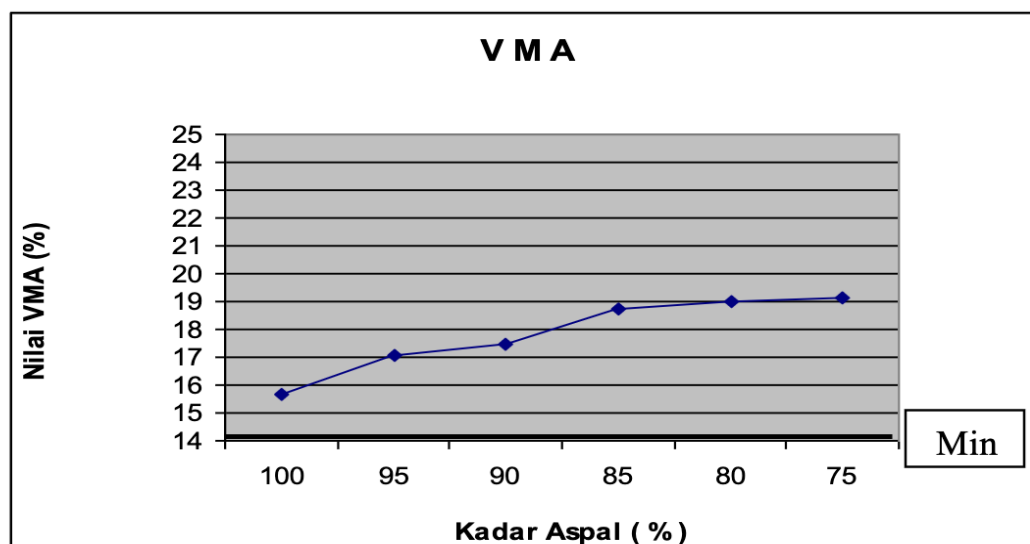
Void In The Mix (VIM) merupakan prosentase rongga dalam campuran, nilai VIM berpengaruh kepada keawetan dari campuran aspal agregat, semakin tinggi nilai VIM menunjukkan semakin besar rongga dalam campuran sehingga campuran bersifat porous, hal ini mengakibatkan campuran menjadi kurang rapat dimana air dan udara mudah masuk ke rongga-rongga dalam campuran, yang menyebabkan mudah teroksidasi mengurangi keawetannya. Pada campuran AC-WC, VIM marshall standar dibatasi antara 3% sampai 5%. Hal ini dimaksudkan untuk menghindari terjadinya deformasi plastis setelah campuran mendapatkan pemadatan tambahan oleh beban lalu lintas. Parameter VIM digunakan untuk mengetahui besarnya rongga dalam campuran, sedemikian hingga tidak terlalu kecil (menimbulkan "*bleeding*") atau terlalu besar (menimbulkan oksidasi penuaan aspal, porous). Berikut contoh gambar grafik hubungan kadar aspal dengan VIM :



Gambar 2. 4 Hubungan Kadar Aspal Dengan VIM

2.8.3 *Void In Mineral Agregate (VMA)*

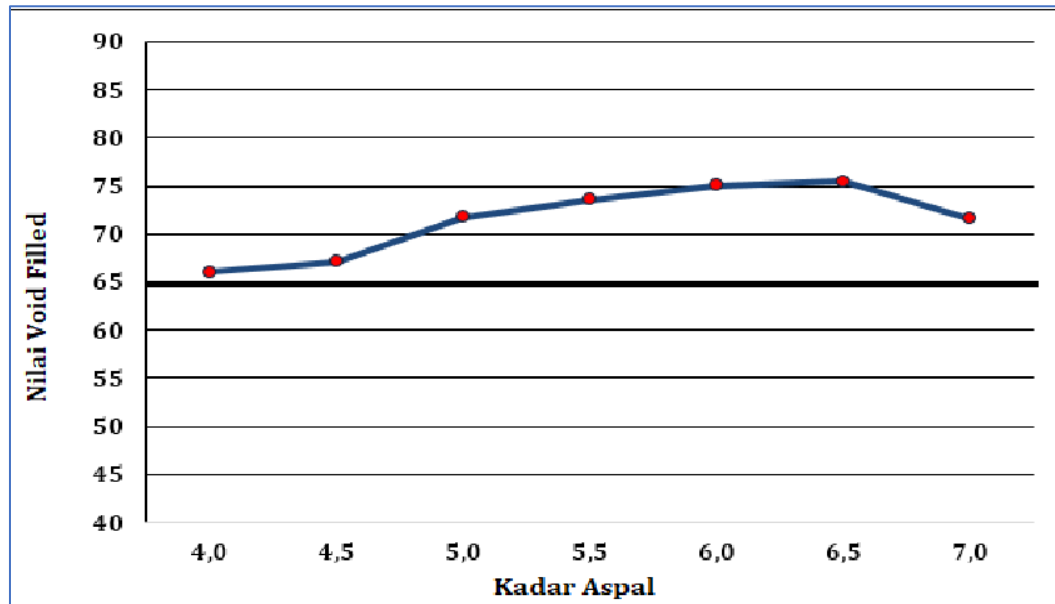
Void In Mineral Agregat (VMA) merupakan rongga udara antar butiran agregat yaitu rongga udara yang ada diantara partikel campuran agregat aspal yang sudah dipadatkan termasuk ruang yang terisi aspal yang dinyatakan dalam persen terhadap total volume campuran aspal agregat, faktor-faktor yang mempengaruhi void in mineral aggregate antara lain gradasi agregat (komposisi campuran agregat dan ukuran diameter butir terbesar), energi pemadat, kadar aspal dan bentuk butiran. Contoh gambar grafik hubungan kadar aspal dengan nilai VMA dapat dilihat pada gambar dibawah ini :



Gambar 2. 5 Hubungan Kadar Aspal Dengan VMA

2.8.4 Void Filled with Bitumen (VFB)

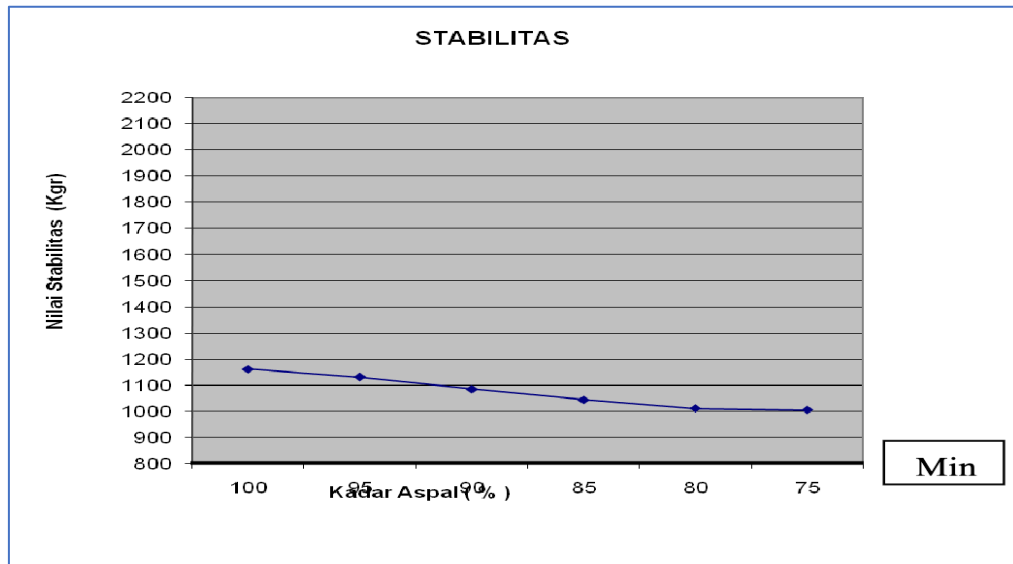
VFB (*Void Filled with Bitumen*) adalah rongga terisi aspal pada campuran setelah mengalami proses pemadatan. Adapun faktor-faktor yang mempengaruhi nilai VFB antara lain adalah kadar aspal, gradasi agregat, energi pemadat (jumlah dan temperatur pemadatan), dan absorpsi agregat. Contoh gambar grafik hubungan kadar aspal dengan nilai VFB dapat dilihat dibawah ini :



Gambar 2. 6 Hubungan Kadar Aspal dengan Nilai VFB

2.8.5 Stabilitas

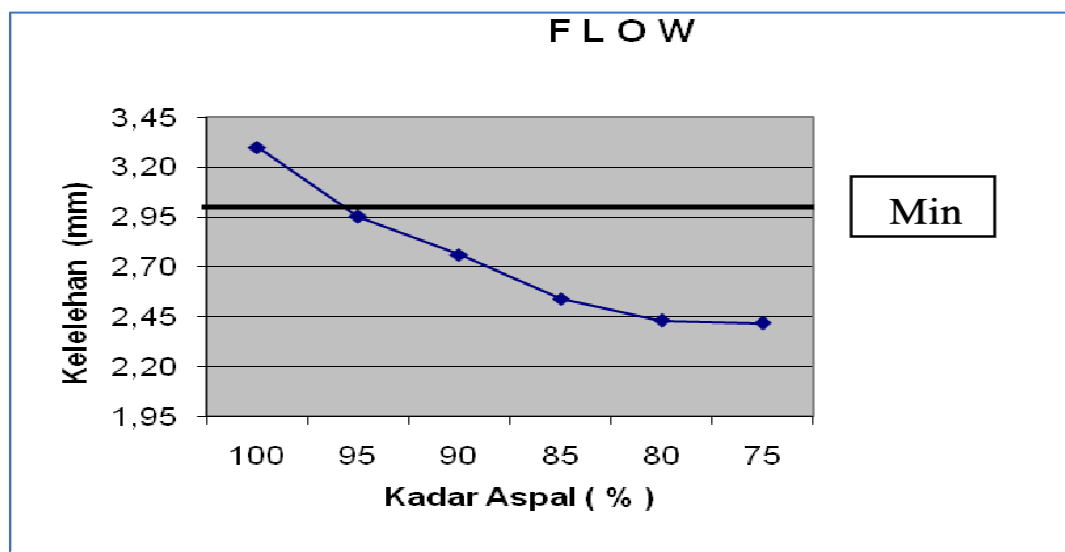
Stabilitas merupakan kemampuan lapis perkerasan menerima beban lalu lintas tanpa mengalami perubahan bentuk tetap seperti gelombang, alur (*rutting*), maupun mengalami *bleeding*, nilai stabilitas dipengaruhi oleh kohesi/penetrasi, kadar aspal, gesekan (*internal friction*), sifat saling mengunci (*interlocking*) dari partikel-partikel agregat, bentuk, tekstur permukaan serta gradasi agregat. Nilai stabilitas yang terlalu tinggi menyebabkan campuran menjadi terlalu kaku, hal ini berakibat perkerasan mudah menjadi retak bila menerima beban, tapi bila nilai stabilitas yang terlalu rendah campuran aspal agregat akan mudah mengalami rutting oleh adanya beban lalu lintas. Contoh nilai stabilitas dapat dilihat pada gambar dibawah ini :



Gambar 2. 7 Hubungan Kadar Aspal Dengan Stabilitas

2.8.6 Flow

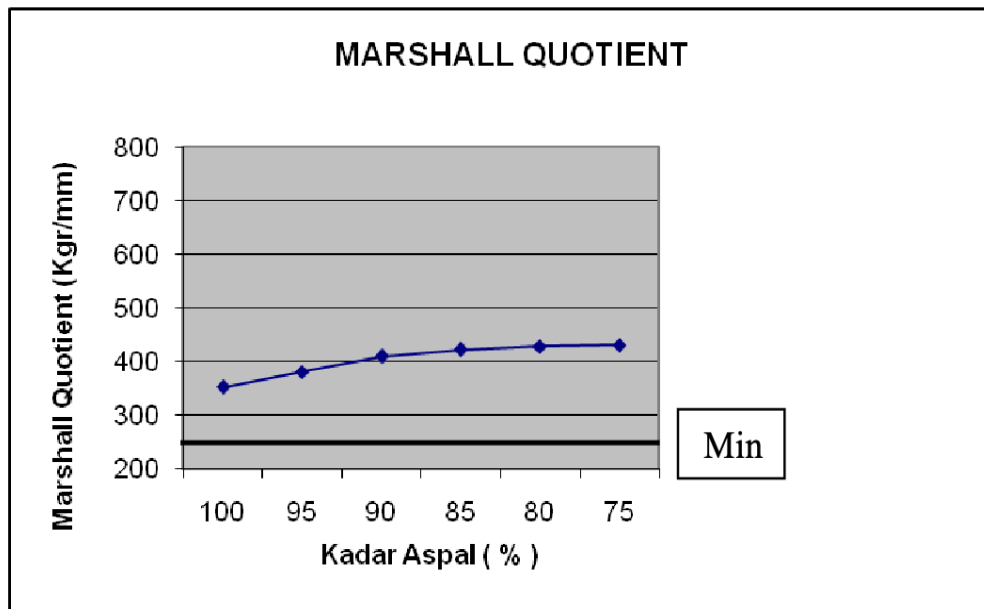
Flow (kelelehan) adalah deformasi vertikal yang terjadi mulai dari awal pembebanan sampai dengan kondisi stabilitas menurun, yang menunjukkan besarnya deformasi yang terjadi pada lapis perkerasan akibat menahan beban yang diterimanya, pengujian dengan alat marshall. *Flow* (kelelehan) merupakan besarnya perubahan bentuk plastis suatu benda uji campuran agregat yang terjadi akibat pembebanan yang dilakukan sampai batas keruntuhan, dinyatakan dalam panjang. Contoh nilai *flow* dapat dilihat pada gambar dibawah ini :



Gambar 2. 8 Hubungan Kadar Aspal Dengan *Flow*

2.8.7 Marshall Quotien

Marshall Quotient merupakan hasil bagi marshall dengan *flow*. Nilai *flow* menggambarkan nilai fleksibilitas dari campuran. Semakin besar nilai MQ berarti campuran semakin kaku dan sebaliknya semakin kecil nilai MQ, maka campuran semakin lentur. Faktor-faktor yang mempengaruhi hasil bagi Marshall yaitu nilai *stability* dan *flow*, penetrasi, viscositas aspal, kadar aspal campuran, bentuk dan tekstur permukaan agregat, gradasi agregat. Contoh hubungan nilai kadar aspal dengan nilai *Marshall Quotient* dapat dilihat pada gambar dibawah ini :



Gambar 2. 9 Hubungan Kadar Aspal Dengan MQ

2.9 Volumetrik Campuran Aspal

Sifat volumetrik campuran aspal adalah sifat fisik campuran yang digunakan untuk evaluasi awal desain aspal campuran (bentuk benda uji) di laboratorium. Rumus yang digunakan untuk menghitung volume campuran aspal panas adalah :

1) Berat Jenis Kering (*Bulk Specific Gravity*)

Agregat terdiri dari fraksi – fraksi : agregat kasar, agregat halus, *filler*, dimana masing – masing mempunyai berat jenis yang berbeda satu sama lainnya, sehingga berat jenis kering (*bulk specific gravity*) dari total agregat dapat dihitung berdasarkan Persamaan 2.1

$$Gsb = \frac{P1 + P2 \dots + Pn}{\frac{P1}{Gsb1} + \frac{P2}{Gsb2} + \dots + \frac{Pn}{Gsbn}} \quad (2.1)$$

Dengan :

Gsb = Berat Jenis Bulk Total Agregat

P1, P2, ..., Pn = Persentase masing – masing fraksi agregat

G1, G2, ... Gn = Berat jenis bulk masing - masing agregat

Berat jenis bahan pengisi sulit dihitung dengan teliti, namun demikian jika berat jenisnya nyata (*apparent*) bahan pengisi dimasukan, maka kesalahannya biasanya dapat diabaikan.

2) Berat Jenis Efektif Agregat

Perbandingan antara berat bahan di udara (tidak termasuk rongga yang menyerap air) pada satuan volume dan suhu tertentu, dengan berat air destilasi dengan volume yang sama dengan volume tertentu. Berat jenis maksimum campuran (Gmm) diukur dengan AASHTO T – 209 – 90 , maka berat jenis efektif campuran Gse termasuk rongga dalam partikel agregat yang menyerap aspal dapat ditentukan dengan rumus Persamaan 2.2

$$Gse = \frac{Pmm - Pb}{\frac{Pmm}{Gmm} - \frac{Pb}{Gb}} \quad (2.2)$$

Dengan :

Gse = Berat Jenis efektif agregat.

Gmm = Berat jenis maksimum campuran, rongga udara nol (0).

Pmm = Persentase berat total campuran (=100%).

Pb = Kadar aspal, dalam persen terhadap berat total campuran.

Gb = Berat jenis aspal

Jumlah aspal yang diserap oleh agregat umumnya lebih besar daripada jumlah air yang diserap. Berat jenis efektif agregat harus berada di antara

berat jenis dan berat jenis agregat. Berat jenis agregat dapat dihitung dengan menggunakan Persamaan 2.3.

$$G_{sa} = \frac{P_1 + P_2 + \dots + P_n}{\frac{P_1}{G_1} + \frac{P_2}{G_2} + \dots + \frac{P_n}{G_n}} \quad (2.3)$$

Dengan

G_{sa} = Berat semu total agregat

P_1, P_2, \dots, P_n = Persentase dalam berat agregat 1,2,n

G_1, G_2, \dots, G_n = Berat jenis curah agregat

3) Berat Jenis Maksimum Campuran

Saat merancang campuran aspal dengan berat jenis agregat yang diketahui, berat jenis campuran maksimum (G_{mm}) dari setiap kadar aspal (Persamaan 2.4) diperlukan untuk menghitung porositas setiap kadar aspal. Keakuratan hasil pengujian terbaik diperoleh ketika kadar campuran aspal mendekati kadar aspal optimum. Demikian pula, direkomendasikan untuk menguji berat jenis maksimum pada 3 sampel. Berat jenis campuran maksimum (G_{mm}) untuk setiap kadar aspal dapat dihitung dengan menggunakan rata-rata berat jenis efektif (persamaan 2.4).

$$G_{mm} = \frac{P_{mm}}{\frac{P_s}{G_{se}} + \frac{P_b}{G_b}} \quad (2.4)$$

Dengan :

G_{se} = Berat jenis efektif agregat

G_{mm} = Berat jenis maksimum campuran, rongga udara nol (0)

P_{mm} = Persentase berat total campuran (=100%)

P_b = Kadar aspal, dalam persen terhadap berat total campuran

G_b = Berat jenis aspal

4) Berat Jenis *Bulk* Campuran Aspal Beton Persamaan 2.5

$$G_{mb} = \frac{B_k}{B_{ssd} - B_a} \quad (2.5)$$

Dengan :

Gmb = Berat jenis campuran aspal beton

Bk = Berat kering campuran aspal beton (gram)

Bssd = Berat kering permukaan campuran aspal (gram)

Ba = Campuran aspal dalam air (gram)

5) Kepadatan (*Density*)

Densitas adalah tingkat densitas campuran setelah pemadatan. Massa jenis adalah berat campuran per satuan volume. Campuran padat dapat menahan beban yang lebih tinggi dibandingkan dengan campuran berdensitas rendah (Persamaan 2.6)

$$D = \frac{4 Ma}{\pi d^2 h} \quad (2.6)$$

Dengan :

D = Kepadatan benda uji (gram/cm³)

Ma = Berat benda uji di udara (gram)

d = Diameter benda uji (cm)

h = Tinggi benda uji (cm)

6) Rongga Udara (Air Void)

a. Rongga pori di antara agregat (VMA)

Ruang pori intermineral (VMA) adalah ruang antara agregat pada perkerasan aspal, termasuk rongga udara dan volume efektif aspal (tidak termasuk volume aspal yang diserap oleh batuan). kental. Perhitungan VMA dihitung untuk berat total campuran menggunakan Persamaan 2.7.

$$VMA = 100 - \left[\frac{Gmb \times Ps}{Gsb} \right] \quad (2.7)$$

Dengan :

VMA = Volume pori di antara agregat dalam campuran

Gsb = Berat jenis bulk agregat

Gmb = Berat jenis bulk campuran padat

Ps = Kandungan agregat, persen terhadap total campuran

b. Rongga pori dalam campuran beraspal (VIM)

Rongga pencampur udara dalam campuran aspal terdiri dari lapisan udara di antara partikel agregat yang tertutup oleh aspal. Porositas dalam persen dapat ditentukan dengan menggunakan Persamaan 2.8.

$$VIM = 100 \times \frac{G_{mm} - G_{mb}}{G_{mm}} \quad (2.8)$$

Dengan :

VIM = Volume pori dalam campuran aspal padat

Gmm = Berat jenis maksimum campuran aspal, rongga udara nol

Gmb = Berat jenis bulk campuran padat.

c. Rongga pori yang terisi aspal (VFB)

Asphalt-Filled Pore Void (VFB) adalah fraksi kosong agregat yang terisi aspal (VMA) tidak termasuk aspal yang terserap ke dalam agregat.

Rumus untuk VFB ditunjukkan pada Persamaan 2.9

$$VFB = 100 \times \frac{(VMA - VIM)}{VMA} \quad (2.9)$$

Dengan :

VFB = Volume pori yang terisi aspal

VMA = Rongga diantara Mineral Agregat, persen volume bulk

VIM = Volume pori dalam campuran aspal padat

2.10 Metode Pengujian Campuran Aspal

Metode uji *Marshall* adalah metode yang paling umum digunakan. Dalam metode ini, pengujian memiliki tiga parameter penting. Artinya, tegangan maksimum yang dapat ditahan benda uji sebelum patah, atau set permanen sebelum patah, sering disebut stabilitas *Marshall*. Ini dikenal sebagai stabilitas *Marshall*. Aliran yang disebut *Marshall Quotient* (MQ) dan turunan yang merupakan

perbandingan keduanya (stabilitas *Marshall* dan aliran *Marshall*) menunjukkan ketahanan campuran aspal-beton terhadap deformasi permanen seiring bertambahnya. adalah nilai kekakuan. (Wijayati, 2016)

Rancangan campuran berdasarkan metode Marshall ditemukan oleh Bruce Marshall, dan telah distandarisasi oleh ASTM ataupun AASHTO melalui beberapa modifikasi, yaitu ASTM D 1559-76, atau AASHTO T-245-90. Prinsip dasar metode Marshall adalah pemeriksaan stabilitas dan kelelahan (*flow*), serta analisis kepadatan dan pori dari campuran padat yang terbentuk. Alat marshall merupakan alat tekan yang dilengkapi dengan *proving ring* (cincin penguji) berkapasitas 22,2 KN (5000 lbs) dan *flowmeter*. *Proving ring* digunakan untuk mengukur nilai stabilitas, dan *flowmeter* untuk mengukur kelelahan plastis atau *flow*. Benda uji marshall berbentuk silinder berdiameter 4 inci (10,2 cm) dan tinggi 2,5 inci (6,35 cm). Prosedur pengujian Marshall mengikuti SNI 06-2489-1991, atau AASHTO T 245-90, atau ASTM D 1559-76. Secara garis besar pengujian Marshall meliputi: persiapan benda uji, penentuan berat jenis bulk dari benda uji, pemeriksaan nilai stabilitas dan *flow*, dan perhitungan sifat volumetric benda uji. Pada persiapan benda uji, ada beberapa hal yang perlu diperhatikan antara lain:

1. Jumlah benda uji yang disiapkan.
2. Persiapan agregat yang akan digunakan.
3. Penentuan temperatur pencampuran dan pemadatan.
4. Persiapan campuran aspal beton.
5. Pemadatan benda uji.
6. Persiapan untuk pengujian Marshall.

Jumlah benda uji yang disiapkan ditentukan dari tujuan dilakukannya uji marshall tersebut. AASHTO menetapkan minimal 3 buah benda uji untuk setiap kadar aspal yang digunakan. Agregat yang akan digunakan dalam campuran dikeringkan di dalam oven pada temperatur 105-110°C. Setelah dikeringkan agregat dipisah-pisahkan sesuai fraksi ukurannya dengan mempergunakan saringan. Temperatur pencampuran bahan aspal dengan agregat adalah temperatur pada saat aspal mempunyai viskositas kinematis sebesar 170 ± 20 centistokes, dan temperatur pemadatan adalah temperatur pada saat aspal mempunyai nilai viskositas kinematis sebesar 280 ± 30 centistokes.

Prinsip dasar dari metode marshall adalah pemeriksaan stabilitas dan keelehan (*flow*), serta analisis kepadatan dan pori dari campuran padat yang terbentuk. Dalam hal ini benda uji atau briket beton aspal padat dibentuk dari gradasi agregat campuran yang telah didapat dari hasil uji gradasi, sesuai spesifikasi campuran. Pengujian Marshall untuk mendapatkan stabilitas dan keelehan (*flow*) mengikuti prosedur SNI 06-2489-1991 atau AASHTO T245-90. Dari hasil gambar hubungan antara kadar aspal dan parameter Marshall, maka akan diketahui kadar aspal optimumnya.

I. Nilai Stabilitas

Berdasarkan nilai masing-masing yang ditunjukkan oleh jarum jam. Stabilitas adalah parameter yang menyatakan beban maksimum dalam kilogram yang dapat diserap oleh campuran aspal jika terjadi keruntuhan. Jika nilai Stabilitas terlalu tinggi, karet akan terlalu kaku dan kurang tahan lama. Nilai stabilitas dapat dihitung menggunakan persamaan 2.10.

$$S = q \times C \times k \quad (2.10)$$

Dengan :

S = Nilai stabilitas terkoreksi (kg)

q = Pembacaan stabilitas pada dial alat *Marshall*

C = Angka koreksi ketebalan

k = Faktor kalibrasi alat.

II. Kelelahan (*Flow*)

Flow adalah defleksi total, dinyatakan dalam milimeter (mm), yang terjadi pada sampel kompon perkerasan sampai titik tegangan maksimum tercapai selama pengujian stabilitas *marshall*. Seperti halnya penentuan nilai stabil, nilai aliran biasanya diberikan dalam milimeter (mm). Senyawa dengan titik leleh yang lebih rendah lebih sulit dan cenderung terurai sebelum masa manfaatnya

III. *Marshall Quotient*

Untuk mengetahui ukuran kekakuan beton aspal perlu dianalisis dengan mencari nilai *Marshall Quotient* (MQ), merupakan hasil bagi antara stabilitas dibagi kelelehan (*flow*), yang dapat dihitung dengan menggunakan Persamaan 2.11.

$$MQ = \frac{MS}{MF} \quad (2.11)$$

Dengan:

MS = Stabilitas *Marshall*, (kg)

MF = Kelelehan (*Flow*) *Marshall* (mm)

2.11 Pengujian Perendaman Marshall (*Marshall Immersion*)

Immersion Test atau metode uji perendaman pada dasarnya sama dengan metode uji *Marshall*, yang membedakan adalah pada waktu perendaman benda uji. Menurut AASHTO T. 165 – 74 atau ASTM D. 1075 – 54 (1969) ada dua metode uji perendaman *Marshall* (*Marshall Immersion Test*) yaitu uji perendaman selama 4 x 24 jam dengan suhu $\pm 50^\circ$ dan uji perendaman selama 1 x 24 jam dengan suhu $\pm 60^\circ$. Uji perendaman ini ditunjukkan untuk mengetahui durabilitas dari suatu ampuran beraspal yang dinyatakan sebagai nilai indeks kekuatan sisa (IKS), yang dirumuskan pada Persamaan 2.12. (Yuniarti, 2019)

$$IKS = \frac{\text{Stabilitas Rendaman 24 Jam}}{\text{Stabilitas Rendaman 30 Menit}} \times 100 \% \quad (2.12)$$

2.12 Analisa Data

Setelah penyiapan benda uji selesai, data yang diperoleh dari benda uji tersebut digunakan berupa data tinggi benda uji, beratnya dalam air, beratnya di udara, berat kering jenuhnya, data-data tersebut adalah digunakan dalam perhitungan Untuk mengetahui nilai volumetrik campuran, nilai parameter *Marshall*, dan nilai parameter tersebut bila limbah kaca digunakan sebagai pengganti sebagian agregat halus pada campuran *marshall*-meredam AC-WC.

2.13 Analisa Regresi

Analisis regresi adalah studi tentang ketergantungan satu atau lebih variabel independen terhadap variabel dependen untuk memprediksi nilai variabel dependen. Ada dua jenis variabel dalam analisis regresi:

- Variabel bebas/*variabel independen*
Variabel Variabel bebas adalah variabel yang nilainya tidak bergantung pada variabel lain. Variabel bebas ini adalah kadar aspal
- Variabel terikat / *variabel dependen*
Variabel terikat adalah variabel yang keadaannya dipengaruhi oleh variabel bebas. Variabel terikat ini terdiri dari VIM, VMA, VFB, Stabilitas *marshall*, *Flow* (kelelehan), *Marshall Quotient*.

Beberapa jenis persamaan regresi yaitu :

- Persamaan Linier
 $Y = a + bx$
- Persamaan Parabola kuadratik (*polynomial* tingkat dua)
 $Y = a + bx + cx^2$
- Persamaan Parabola Kubik (*polynomial* tingkat tiga)

$$Y = ax^3 + bx^3 + cx + d$$

Keterangan :

Y = nilai variabel terikat X = nilai variabel bebas

a,b,c,d = koefisien

Setelah menemukan persamaan garis regresi dari kumpulan data dan menyusunnya pada sebar, Anda dapat menggunakan program komputer untuk membuat garis regresi linier dari plot tersebut. Garis regresi memberikan persamaan regresi dan nilai koefisien korelasi.

Untuk menunjukkan seberapa kuat hubungan antar variabel dalam penelitian ini, digunakan teknik analisis yang disebut koefisien korelasi, dilambangkan rho(r). Nilai koefisien korelasi diberikan oleh Persamaan 2.13.

$$r = \frac{n \sum XY - \sum X \sum Y}{\sqrt{\{\sum X^2 - (\sum X)^2\} \{n \sum Y^2 - (\sum Y)^2\}}} \quad (2.13)$$

Dengan :

n = jumlah data

X = variable bebas (absis)

Y = variable terikat (ordinat)

r = koefisien korelas

Nilai r menunjukkan keeratan hubungan dari variabel bebas secara simulator atau serentak.

- Nilai $r = 0$ (tidak ada hubungan)
- $0 < r < 0,2$ (sangat lemah)
- $0,2 < r < 0,4$ (lemah)
- $0,4 < r < 0,7$ (sedang)
- $0,7 < r < 0,9$ (kuat)
- $0,9 < r < 1$ (sangat kuat)

Koefisien determinasi sederhana (r^2) adalah satu ukuran yang digunakan untuk mengukur pengaruh variabel bebas terhadap variansi variabel tidak bebas, dengan $0 < r^2 < 1$.