

## BAB II TINJAUAN PUSTAKA

### 2.1. Perkerasan Jalan

Menurut Sukirman, Silvia, 1995, sejarah perkerasan jalan dimulai dengan ditemukannya roda sekitar 3500 SM di Mesopotamia, hingga konstruksi perkerasan jalan berkembang pesat pada zaman keemasan Romawi. Jhon ouden Mac Adam (1756 – 1836), piere Marie Jerome Tresaguet (1716 – 1796) dan Thomas Telford (1757 – 1834) merupakan orang-orang yang pertama kali memperkenalkan konstruksi perkerasan dengan lapisan batu pecah berukuran tertentu yang di atasnya ditutup dengan batuan yang lebih kecil sebagai lapisan pengunci.

Perkerasan jalan merupakan suatu konstruksi yang terdiri dari beberapa lapisan dengan karakteristik yang berbeda, diletakkan di atas tanah dasar (sub grade) yang telah dipadatkan. Dalam menjalankan fungsinya lapisan-lapisan tersebut menerima beban lalu lintas dan menyebarkan kelapisan dibawahnya.

### 2.2. Bagian-bagian Lapisan Perkerasan

Konstruksi perkerasan jalan raya terdiri dari :

#### A. Lapisan Permukaan.

Lapisan ini terletak paling atas pada konstruksi jalan raya, disebut lapisan permukaan yang berfungsi :

1. Penahan beban roda, mempunyai stabilitas untuk menahan beban roda.
2. Kedap air, sehingga air hujan yang jatuh di atasnya tidak dapat menembus sampai ke bawah lapisan sehingga tidak melemahkan konstruksi jalan.
3. Lapis aus, akibat menderita gesekan karena gaya rem pada kendaraan sehingga mudah menjadi aus.

Guna dapat memenuhi fungsi tersebut, pada umumnya lapisan permukaan dibuat dengan menggunakan bahan pengikat aspal.

#### B. Lapis Pondasi Atas.

Lapisan pondasi ini terletak antara lapisan permukaan dan pondasi bawah, fungsi lapisan pondasi atas adalah sebagai :

1. Bagian perkerasan yang menahan gaya lintang dari beban roda dan menyebarkan beban ke bawahnya.
2. Lapisan peresapan untuk lapisan pondasi bawah.
3. Bantalan untuk lapisan permukaan.

#### C. Lapis Pondasi Bawah.

Lapisan ini terletak diantara lapisan pondasi atas dan tanah dasar. Lapisan pondasi ini berfungsi sebagai :

1. Bagian konstruksi perkerasan yang menyebarkan beban roda ke tanah dasar.
2. Efisiensi penggunaan material, material pondasi bawah relatif murah dibandingkan dengan lapisan perkerasan di atasnya.
3. Mengurangi lapisan di atasnya yang lebih mahal.

#### D. Tanah dasar

Lapisan tanah 50-100 cm diatas mana diletakkan pondasi bawah dinamakan lapisan tanah dasar. Lapisan ini yang paling akhir menerima beban roda dari lapisan diatasnya.

### 2.3. Jenis-jenis Lapisan Permukaan

Pada umumnya jenis lapis permukaan di Indonesia ada dua macam yaitu :

#### 1. *Lapisan bersifat struktural.*

Lapisan yang bersifat struktural berfungsi sebagai lapisan yang menahan dan menyebarkan beban roda kendaraan.

Lapisan struktural ini terdiri atas :

- a. Lapisan penetrasi macadam (Lapen), merupakan suatu lapis perkerasan yang terdiri dari agregat pokok dengan agregat pengunci bergradasi terbuka seragam yang diikat oleh aspal keras dengan cara disemprotkan diatasnya dan dipadatkan lapis demi lapis dan apabila digunakan sebagai lapis permukaan perlu diberi laburan aspal dengan batu penutup. Tebal lapisan bervariasi antara 4 – 10 cm.
- b. Lapis aspal campur dingin (Lasbutag), adalah campuran yang terdiri dari agregat kasar, agregat halus, asbuton, bahan peremaja dan filler (bila diperlukan) yang dicampur, dihampar dan dipadatkan secara dingin. Tebal lapisan antara 3 – 5 cm.

- c. Lapis aspal beton (Laston) adalah suatu lapisan pada konstruksi perkerasan jalan yang terdiri dari agregat kasar, agregat halus, filler dan aspal keras yang dicampur, dihampar dan dipadatkan dalam keadaan panas dan pada suhu tertentu.

## 2. Lapisan bersifat non struktural.

Lapisan bersifat non struktural ini berfungsi sebagai lapisan aus dan kedap air. Lapisan ini antara lain :

- a. Labur aspal satu lapis (Burtu) merupakan penutup yang terdiri dari lapisan aspal yang ditaburi dengan satu lapis agregat bergradasi seragam, dengan ketebalan maksimum 2 cm.
- b. Lapis batu dua lapis (Burda) merupakan lapisan penutup yang terdiri dari lapisan aspal yang terdiri dari lapisan aspal yang ditaburi dengan agregat yang dikerjakan dua kali secara berurutan dengan ketebalan maksimum 3,5 cm.
- c. Lapisan tipis aspal pasir (Latasir) yang merupakan lapisan penutup yang terdiri dari lapisan aspal dan pasir alam yang bergradasi lurus dicampur, dihamparkan dan dipadatkan pada suhu tertentu dengan ketebalan 1 – 2 cm.
- d. Leburan aspal (Buras) merupakan lapisan penutup yang terdiri dari lapisan aspal taburan pasir dengan ukuran butir maksimal 3/8 inch.
- e. Lapisan tipis asbuton murni (Latasbum) adalah lapisan penutup yang terdiri dari aspal buton dan bahan pelunak dengan perbandingan tertentu yang dicampur secara dingin dengan ketebalan 1 cm.
- f. Lapis tipis aspal beton (Lataston), yang biasanya dikenal dengan nama *Hot Rolled Sheet* (HRS). Lataston ini merupakan lapisan penutup yang terdiri dari campuran agregat bergradasi timpang dan aspal keras dicampur dan dipadatkan dalam keadaan tertentu. Tebal dari lapisan ini antara 2,5 – 3 cm.

### 2.4. Material Penyusun Lapisan Permukaan

Material penyusun lapisan permukaan secara garis besar terdiri dari tiga bagian yaitu : agregat, aspal, dan filler. Masing-masing material mempunyai kontribusi yang spesifik terhadap kemampuan layanan lapisan surface sesuai dengan sifat-sifat fisiknya.

### 2.4.1. Agregat

Sifat dan kualitas agregat menentukan kemampuannya dalam memikul beban lalu lintas dan menyebarkan beban kelapisan di bawahnya. Sifat agregat yang menentukan kualitasnya sebagai bahan konstruksi perkerasan dapat dikelompokkan menjadi tiga yaitu :

#### A. Kekuatan dan Keawetan agregat dipengaruhi oleh :

##### 1. Gradasi

Gradasi adalah susunan butir agregat sesuai ukurannya. Ukuran butir dapat diperoleh melalui pemeriksaan analisis saringan. Gradasi agregat mempengaruhi besarnya rongga antar butir yang akan menentukan stabilitas dan kemudahan dalam proses pelaksanaan. Pengaruh gradasi terhadap konstruksi adalah terhadap kepadatannya, agregat yang bergradasi baik akan lebih mudah dipadatkan jika dibandingkan dengan agregat yang bergradasi seragam. Menurut Sukirman (1995) gradasi agregat dapat dibedakan atas :

- a. Gradasi seragam (uniform graded), agregat yang terdiri dari butir-butir agregat berukuran sama atau hampir sama. Campuran agregat ini mempunyai pori antar butir yang cukup besar, sehingga sering dinamakan juga agregat bergradasi terbuka.
- b. Gradasi rapat (dense graded), merupakan campuran agregat kasar dan halus dalam porsi berimbang, sehingga dinamakan juga agregat bergradasi baik (well graded)
- c. Gradasi buruk/jelek (poorly graded), sering disebut juga gradasi senjang. Agregat dengan gradasi senjang akan menghasilkan lapisan perkerasan yang mutunya terletak antara kedua jenis diatas.

##### 2. Ukuran maksimum

Ukuran maksimum butir agregat dapat dinyatakan dengan mempergunakan:

- a. ukuran maksimum agregat yaitu : menunjukkan ukuran saringan terkecil dimana agregat yang lolos saringan tersebut sebanyak 100%.
- b. Ukuran nominal maksimum agregat yaitu : menunjukkan ukuran saringan tersebut dimana agregat yang tertahan saringan tersebut sebanyak tidak lebih dari 100%. Ukuran maksimum agregat adalah satu saringan atau ayakan yang lebih besar dari ukuran nominal maksimum.

##### 3. Kebersihan agregat (cleanliness)

Kebersihan agregat ditentukan dari banyaknya butir-butir halus yang lolos saringan No.200, agregat yang banyak mengandung material yang lolos saringan No.200, jika dipergunakan sebagai bahan campuran beton aspal, akan menghasilkan beton aspal berkualitas rendah. Hal ini disebabkan material halus membungkus partikel agregat yang lebih kasar, sehingga ikatan antara agregat dan bahan pengikat, yaitu aspal, akan berkurang, dan berakibat mudah lepasnya ikatan antara aspal dan agregat.

4. Daya tahan agregat

Merupakan ketahanan agregat terhadap adanya penurunan mutu akibat proses mekanis dan kimiawi. Untuk pengaruh mekanis dapat diperiksa dengan Los Angeles Abrasion Test.

5. Bentuk dan tekstur agregat

Bentuk butir yang bersudut-sudut (kubus) akan memudahkan untuk saling mengunci satu sama lain, sehingga akan menambah kestabilan dalam campuran. Sedangkan bentuk butiran yang bulat/lonjong kurang memberikan ikatan satu sama lainnya, karena pertemuan antar butiran hanya merupakan titik singgung saja dan pada umumnya butiran bulat, lonjong mempunyai permukaan yang licin—sehingga mudah bergerak bila terkena beban di atasnya. Susunan permukaan yang kasar mempunyai kecenderungan untuk menambah kekuatan campuran, bila dibandingkan dengan permukaan licin serta dapat mengikat aspal dengan baik.

B. Kemampuan agregat dilapisi aspal dengan baik dipengaruhi oleh :

1. Porositas
2. Kebersihan
3. Berat jenis
4. Kemungkinan untuk dibasahi air
5. Sifat mineral / senyawa penyusun agregat

C. Kemudahan dalam melaksanakan dan menghasilkan lapisan yang nyaman dan aman, dipengaruhi oleh :

1. Tahan geser (skid resistance)
2. campuran yang memberikan kemudahan dan pelaksanaan

#### 2.4.2. Aspal

Aspal didefinisikan sebagai agregat yang berwarna hitam atau coklat tua, pada temperatur ruang berbentuk padat sampai agak padat. Jika dipanaskan sampai temperatur tertentu aspal dapat menjadi lunak/cair sehingga dapat membungkus partikel agregat, pada pembuatan aspal beton atau dapat masuk ke dalam pori-pori yang ada pada penyempotan penyiraman pada perkerasan macadam atau pelaburan. Jika temperatur mulai turun, aspal mulai mengeras dan mengikat agregat pada tempatnya (sifatnya termoplastis), (Sukirman, 1995).

Berdasarkan cara memperolehnya aspal dibedakan atas aspal alam dan aspal buatan. Aspal digunakan sebagai lapisan pengikat antar agregat dan pengisi sebagian pori antar agregat (VMA). Material ini juga berfungsi sebagai bagian yang kedap air serta tahan terhadap pengaruh asam, basa, dan garam. Dengan demikian bahan ini berfungsi sebagai pelindung lapisan Base dari pengaruh cuaca secara langsung.

*Asphaltenes* adalah komponen yang mempunyai berat molekul yang paling besar, berwarna hitam atau coklat tua yang tidak larut dalam heptane dan tersusun dari sedikit rantai (chain). Belerang, nitrogen dan oksigen merupakan unsur yang terkandung didalamnya.

*Maltenes* merupakan komponen yang mudah berubah sesuai perubahan temperatur dan umur pelayanan dan larut dalam heptane, terdiri dari resin dan oils. Resins adalah cairan berwarna kuning atau coklat tua yang memberikan sifat adhesi dari aspal, merupakan bagian yang mudah hilang atau berkurang selama masa pelayanan jalan, sedangkan oils merupakan komponen dengan berat molekul yang paling kecil, yang berwarna lebih muda merupakan media dari asphaltenes dan resins. (Klana, 2000)

Adapun sifat-sifat aspal yang dominan pengaruhnya terhadap perilaku campuran lapisan perkerasan adalah :

- a. Thermoplastic : Merupakan viscositas aspal yang berubah sesuai dengan temperatur yang ada.
- b. Rheologic : Hubungan antara tegangan dan regangan yang dipengaruhi oleh waktu. Apabila mendapat pembebanan dengan jangka waktu yang cepat maka ia bersifat elastis, sebaliknya akan bersifat plastis.
- c. Durability : Keawetan aspal yang merupakan daya tahan aspal terhadap perubahan yang disebabkan pengaruh cuaca maupun proses pelaksanaan kontruksi.

### 2.4.3. Filler

Syarat-syarat filler sebagai campuran aspal beton yaitu :

1. Bahan pengisi berasal dari abu batu, abu batu kapur, kapur padam, semen (PC) atau bahan nonplastis lainnya yang bebas dari bahan-bahan organik dan mempunyai nilai indeks plastisitas tidak lebih besar dari 4.
2. Bahan pengisi harus kering dan bebas dari bahan lain yang mengganggu dan apabila dilakukan pemeriksaan analisa saringan secara basah harus memenuhi gradasi menurut tabel 2.1

Tabel 2.1. Ukuran Gradasi Untuk Filler

Ukuran saringan (mm)	Persen berat lolos
0,590	100
0,279	95 - 100
0,149	90 - 100
0,074	70 - 100

Sumber : (SKBI-2.4.26, 1987, h 4).

### 2.5. Kelapa Sawit

Semula tanaman kelapa sawit (*Elaeis Guineensis Jacq*) hanya diusahakan oleh perkebunan-perkebunan besar di Indonesia, tetapi sejak tahun 1977 – 1978 Pemerintah Indonesia mengubah situasi tersebut dengan mengembangkan pola perkebunan rakyat melalui Perusahaan Inti Rakyat Perkebunan (PIRP). (Risza, Suyatno, 1994)

Luasnya perkebunan sawit dewasa ini terus berkembang dengan pesat terutama di daerah Sumatera ; Jambi, Sumatera Utara, Riau, dan Kalimantan. Hal ini disebabkan karena kelapa sawit sekarang ini merupakan salah satu komoditas primadona di Indonesia.

Provinsi Riau sebagai salah satu penghasil kelapa sawit, berdasarkan data BPS 2001 pada tahun 2000 memiliki areal perkebunan seluas 1.023.318 ha dengan total produksinya 1.772.333 ton/tahun, dan areal perkebunan ini terus berkembang dari tahun ke tahun yang diikuti dengan pembangunan pabrik pengolahannya. Hal ini mengakibatkan jumlah limbah sawit terus meningkat.

Salah satu limbah yang dihasilkan dari pengolahan sawit adalah abu sawit yang mengandung unsur dominan silika ( $\text{SiO}_2$ ) sebanyak 31,45% dan unsur CaO sebanyak 15,2%. Abu sawit adalah hasil dari pembakaran cangkang serabut buah kelapa sawit. (dalam Leo Sentosa, dkk. 2003)

Tabel berikut menayangkan komposisi abu sawit yang berasal dari pembakaran sabut, cangkang sawit, dan tandan.

Tabel 2.2. Komposisi Abu Sawit (% Berat)

Unsur/senyawa	Sabut	Cangkang	Tandan
Kalium (K)	9,2	7,5	25,8
Natrium (Na)	0,2	1,1	0,03
Kalsium (Ca)	4,9	1,5	2,7
Magnesium (Mg)	2,3	2,8	2,8
Klor (Cl)	2,5	1,3	4,9
Karbonat (CO <sub>3</sub> )	2,6	1,9	9,2
Nitrogen (N)	0,04	0,05	-
Posfat (P)	1,4	0,9	0,2
Silika (SiO <sub>2</sub> )	59,1	61	19,1

Sumber : Graille dkk. 1985 (dalam Azimi. M, 2003)

Berdasarkan tabel diatas, abu sabut dan cangkang sawit mengandung banyak silika mencapai  $\pm 60\%$  sedangkan abu tandan sawit hanya mengandung silika sebanyak 19%. Selain itu abu sawit juga mengandung ion alkali (Kalium dan Natrium), (dalam Azimi. M, 2003)

Tanaman kelapa sawit biasanya dibagi atas 6 kelompok umur yaitu :

1. TBM 0 – 3 Thn – Muda (belum menghasilkan)
2. TM 3 – 4 Thn – Remaja (Produksi/Ha ; sangat rendah)
3. TM 5 – 12 Thn – Teruna (Produksi/Ha ; mengarah naik)
4. TM 12 – 20 Thn – Dewasa (Produksi/Ha ; posisi puncak)
5. TM 25 Thn – Tua (Produksi/Ha ; mengarah turun)
6. TM 26 Thn – Renta (Produksi/Ha ; sangat rendah)

Dimana :

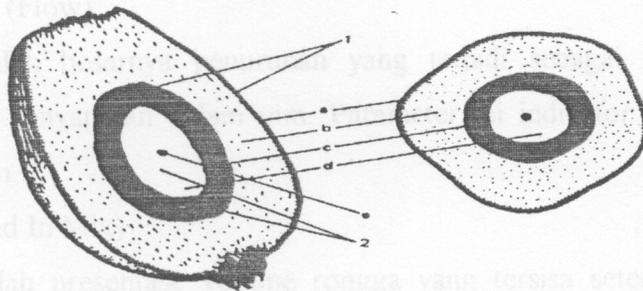
TBM = Tanaman Belum Menghasilkan

TM = Tanaman Menghasilkan

Buah kelapa sawit termasuk buah batu yang terdiri dari 3 bagian yaitu :

- a. Lapisan luar (*Epicarpium*) disebut kulit luar
- b. Lapisan tengah (*Meso Carpium*) disebut daging buah, mengandung minyak sawit
- c. Lapisan dalam (*Endo Carpium*) disebut inti, mengandung minyak inti

Diantara inti dan daging buah terdapat tempurung (cangkang sawit) yang keras. Untuk lebih jelasnya gambar potongan buah kelapa sawit dapat dilihat pada gambar 2.1.



Keterangan :

1. Perikarpium
  - a. Epikarpium (kulit buah)
  - b. Mesokarpium (daging buah/serabut)
2. Biji
  - c. Endokarpium (cangkang/tempurung)
  - d. Endosperm (karnel/daging biji/inti biji)
  - e. Lembega/embrio

Gambar 2.1. Potongan Buah Kelapa Sawit

Biji kelapa sawit (kernel) terdiri dari 3 bagian yaitu :

- a. Kulit biji (*Spermodermis*) disebut cangkang (shell)
- b. Tali pusat (*Funiculus*)
- c. Inti biji (*Nucleus seminis*)

Hasil pengolahan industri kelapa sawit menghasilkan bermacam-macam bahan baku, dan bahan sisa pengolahan, untuk lebih jelasnya mata rantai industri pengolahan komoditi kelapa sawit dapat dilihat pada lampiran I.

## 2.6. Karakteristik Marshall

Sifat yang digunakan untuk mengetahui karakteristik campuran aspal panas yang pertama kali diperkenalkan oleh Bruce Marshall (1939) dan kemudian dikembangkan oleh US Corps of Engineer, Robert FL (dalam Klana, 2000)

Dalam prosedur pengujian metode bina marga sifat-sifat marshall dapat dijelaskan sebagai berikut :

- a. Stabilitas (Stability)

Stabilitas adalah kemampuan lapis perkerasan menahan beban yang terjadi di atasnya tanpa terjadi perubahan bentuk yang permanen, dinyatakan dalam

kilogram. Merupakan parameter untuk mengukur ketahanan terhadap Ruting pada perkerasan jalan.

b. Kelelehan (Flow)

Flow adalah besarnya penurunan yang terjadi sebagai akibat beban yang ada di atasnya, dinyatakan dalam mm. Parameter ini indicator terhadap flexibility lapis perkerasan.

c. VIM (Void In Mix)

VIM adalah presentase volume rongga yang tersisa setelah terisi aspal terhadap volume total campuran yang telah dipadatkan, dinyatakan dalam persen. Kaitannya terhadap kekedapan campuran sebagai efek durability lapisan perkerasan.

d. VFA (Void Filled with Aspal)

VFA adalah presentase volume aspal yang dapat mengisi rongga yang terdapat dalam campuran aspal padat, dinyatakan dalam persen (%). Berkaitan dengan workability dan durability.

e. QM (Quotient Marshall)

QM adalah hasil bagi stabilitas dengan kelelehan untuk pendekatan terhadap tingkat kekakuan dan flexibilitas campuran, dinyatakan dalam kN/mm. Merupakan indicator kelenturan yang potensial terhadap keretakan.

## 2.7. Metode Matrik Invers

Dalam pengujian untuk mendapatkan persentase bagian masing-masing saringan ini penulis menggunakan analisa metode matriks invers. Eliminasi Gaus-Jordan dapat digunakan untuk mencari invers suatu matrik, andaikanlah persamaan linear simultan.

$$\begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} & \dots & a_{1n} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} & \dots & a_{2n} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} & \dots & a_{3n} \\ \cdot & & & & \\ \cdot & & & & \\ a_{n1} & a_{n2} & a_{n3} & \dots & a_{nn} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} X_1 \\ X_2 \\ X_2 \\ \cdot \\ \cdot \\ X_n \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} b_1 \\ b_2 \\ b_3 \\ \cdot \\ \cdot \\ b_n \end{Bmatrix} \quad \text{Dinyatakan dalam notasi matrik sebagai}$$

$[A] \{X\} = \{b\}$ , dengan  $[A]$  merupakan matriks bujur sangkar dengan syarat unsur-unsur diagonal sudah merupakan nilai poros (pivotal). Apabila sama-sama dilakukan perkalian awal pada matriks  $[A]$  dan pada vektor  $\{b\}$  dengan matriks  $[G]$  yaitu :

$$[G][A]\{x\}=[G]\{b\} \dots \dots \dots (2.1)$$

maka dengan memilih  $[G] = [A]^{-1}$ , yaitu invers matriks ini dapat dinyatakan sebagai

$$\{x\}=[A]^{-1}\{b\} \dots \dots \dots (2.2)$$

Prosedur eliminasi *Gouss-Jordan* yang mengubah matriks  $[A]$  menjadi matriks identitas  $[I]$  setelah normalisasi menunjukkan bahwa

$$[G][A]=[A]^{-1}ab \dots \dots \dots (2.3)$$

untuk memperoleh matriks invers  $[A]^{-1}$ , unsur matrik  $[A]$  disandingkan dengan unsur matrik  $[I]$  dalam larik

$$\begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} & \dots & a_{1n} & 1 & 0 & 0 & \dots & 0 \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} & \dots & a_{2n} & 0 & 1 & 0 & \dots & 0 \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} & \dots & a_{3n} & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots \\ a_{n1} & a_{n2} & a_{n3} & \dots & a_{nn} & 0 & 0 & 0 & \dots & 1 \end{bmatrix} \dots \dots \dots (2.4)$$

Dengan prosedur Gauss-Jordan, unsur matrik ini diubah menjadi

$$\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & \dots & 0 & a^{-1}_{11} & a^{-1}_{12} & a^{-1}_{13} & \dots & a^{-1}_{1n} \\ 0 & 1 & 0 & \dots & 0 & a^{-1}_{21} & a^{-1}_{22} & a^{-1}_{23} & \dots & a^{-1}_{2n} \\ 0 & 0 & 1 & \dots & 0 & a^{-1}_{31} & a^{-1}_{32} & a^{-1}_{33} & \dots & a^{-1}_{3n} \\ \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & \dots & 1 & a^{-1}_{n1} & a^{-1}_{n2} & a^{-1}_{n3} & \dots & a^{-1}_{nn} \end{bmatrix} \dots \dots \dots (2.5)$$

Unsur elemen dari invers matriks  $[A]$

$$\begin{bmatrix} a^{-1}_{11} & a^{-1}_{12} & a^{-1}_{13} & \dots & a^{-1}_{1n} \\ a^{-1}_{21} & a^{-1}_{22} & a^{-1}_{23} & \dots & a^{-1}_{2n} \\ a^{-1}_{31} & a^{-1}_{32} & a^{-1}_{33} & \dots & a^{-1}_{3n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ a^{-1}_{n1} & a^{-1}_{n2} & a^{-1}_{n3} & \dots & a^{-1}_{nn} \end{bmatrix} \dots \dots \dots (2.6)$$

## 2.8. Perhitungan Statistik

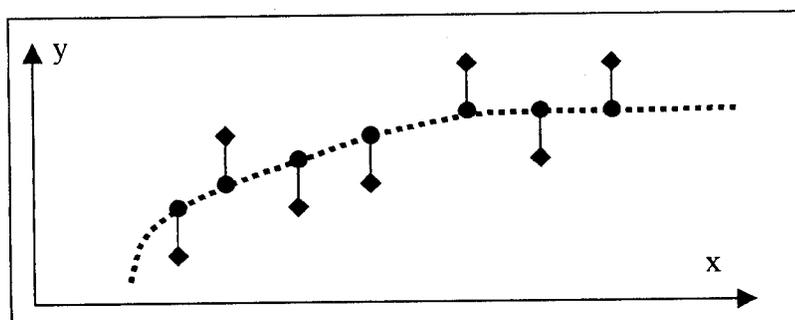
Dalam plotting data hasil pengujian spesimen untuk menggambarkan sifat-sifat marshall secara grafik tentunya akan dihadapkan dengan tingkat keacakan yang beragam dari nilai data tersebut. Apalagi spesimen yang dibuat dalam jumlah relatif besar sehingga deviasinya akan relatif besar, tentunya akan membutuhkan suatu persamaan kurva pendekatan yang biasa mewakili titik-titik plot sampel tersebut.

Menurut Bambang Triatmodjo (dalam Klana, 2000) metode regresi dan korelasi sangat cocok dipakai dalam penentuan kurva fitting yang didasarkan pada jumlah kesalahan yang terjadi pada data. Regresi dan korelasi adalah metode peramalan hubungan antara variable bebas (Prediktor) dengan terikat (kriterium), yang dicocokkan pada data percobaan, terdapat korelasi yang signifikan dan ditandai dengan persamaan prediksi yang disebut persamaan regresi yang dilukiskan dalam suatu garis yang dinamakan garis regresi. Garis ini mungkin linier, polynomial, logaritmik, power dan lain-lain hal ini menurut Hadi sutrisno (dalam Klana 2000).

### 2.8.1. Analisis Kurva

Dalam percobaan benda uji campuran Hot Mix untuk mendapatkan hubungan antara kadar aspal dan sifat-sifat karakteristik marshall, jika absis - x menyatakan kadar aspal dan ordinat - y menyatakan karakteristik Marshall maka persamaan  $y = aebx$  dapat merupakan fungsi kurva untuk menyatakan hubungan x dan y.

Konstanta a dan b dapat ditentukan sehingga analisis kurva bagio hasil benda uji dapat diuji ketelitiannya sebagai rumusan pendekatan hubungan antara kadar aspal dan karakteristik Marshall. Untuk menyatakan perilaku data sebagai perumusan kurva yang akan digunakan pada suatu proses analisis dapat dilihat pada gambar 2.2 dibawah ini :



Gambar 2.2 Analisis kurva data pengamatan

Dengan diberikan  $n$  data pasangan  $\{x_i, y_i = f(x_i)\}$ , dengan  $i = 0, 1, 2, \dots, n$ , maka bila kurva dekatan ditetapkan sebagai fungsi polinomial derajat  $k$ , berarti analisis kurva menetapkan bentuk polinomial yang *representatif* sehingga besaran data hasil perhitungan kurva sesuai.

Dengan memperhatikan Gambar 2.2. kesesuaian ini dinyatakan dengan mendapatkan bentuk polinomial yang memberikan simpangan  $e_i$  semimumimum mungkin. Simpangan atau deviasi minimum antara harga fungsi dan data diperoleh menurut cara kuadrat terkecil (*least square*).

### 2.8.2. Regresi

Proses penentuan suatu fungsi dekatan menggambarkan kecenderungan data dengan simpangan minimum antara nilai fungsi dengan data, disebut regresi. Regresi linear adalah salah satu penyajian data dengan fungsi pendekatan linear.

$$Y = a_0 + a_1 x + e \quad \dots \dots \dots (2.7)$$

Dengan :  $a_0$  dan  $a_1$  = Koefisien fungsi

$e$  = Simpangan kesalahan

Jika dipilih penyajian data dalam fungsi polinomial derajat  $n$ , maka fungsi dapat dinyatakan sebagai

$$P_n(x) = a_0 + a_1 x + a_2 x^2 + a_3 x^3 + \dots + a_n x^n = \sum_{h=0}^n a_h x^h \quad \dots \dots \dots (2.8)$$

dan simpangan kesalahan yang terjadi antara setiap data dengan nilai fungsi adalah

$$e_i = P_n(x_i) - y_i, \quad i = 1, 2, 3, \dots, m \quad \dots \dots \dots (2.9)$$

Apabila ditetapkan fungsi  $S = \sum_{i=0}^m e_i^2$ , maka  $S$  adalah fungsi dari koefisien

polinomial  $P_n(x)$ , yaitu  $S = S(a_0, a_1, a_2, \dots, a_n)$  supaya nilai  $S$  minimum, haruslah ditetapkan koefisien  $a_1$  sehingga turunan parsial  $S$  terhadap setiap koefisien sama dengan nol. dengan koefisien  $a_i$  dengan  $i = 0, 1, 2, \dots, m$ , diperoleh turunan parsial fungsi  $S$  sebagai :

$$\frac{\partial S}{\partial a_0} = 0 \quad \frac{\partial S}{\partial a_1} = 0 \quad \frac{\partial S}{\partial a_2} = 0; \dots \quad \frac{\partial S}{\partial a_k} = 0; \quad k = 0, 1, 2, 3, \dots, m \quad \dots \dots \dots (2.10)$$

Untuk menurunkan rumus regresi, ditinjau fungsi polinomial pangkat tiga sebagai fungsi dekatan

$$P_3(x) = a_0 + a_1x + a_2x^2 + a_3x^3 \dots\dots\dots (2.11)$$

Fungsi simpangan S menjadi

$$\begin{aligned} S &= \{P_3(x_1) - y_1\}^2 + \{P_3(x_1) - y_1\}^2 + \{P_3(x_1) - y_1\}^2 + \dots + \{P_3(x_1) - y_1\}^2 \\ &= (a_0 + a_1x_1 + a_2x_1^2 + a_3x_1^3 - y_1)^2 + (a_0 + a_1x_2 + a_2x_2^2 + a_3x_2^3 - y_2)^2 + \dots \\ &+ (a_0 + a_1x_i + a_2x_i^2 + a_3x_i^3 - y_i)^2 + (a_0 + a_1x_m + a_2x_m^2 + a_3x_m^3 - y_m)^2 \dots\dots\dots (2.12) \end{aligned}$$

Turunan parsial S terhadap  $a_0$  :

$$\begin{aligned} \frac{\partial S}{\partial a_0} = 0 &= 2(a_0 + a_1x_1 + a_2x_1^2 + a_3x_1^3 - y_1)^2(1) + 2(a_0 + a_1x_2 + a_2x_2^2 + a_3x_2^3 - y_2)^2(1) \\ &+ \dots + 2(a_0 + a_1x_i + a_2x_i^2 + a_3x_i^3 - y_i)^2(1) + 2(a_0 + a_1x_m + a_2x_m^2 + a_3x_m^3 - y_m)^2(1) \dots\dots\dots (2.13) \end{aligned}$$

Penyelesaian

$$a_0m + a_1 \sum_{i=1}^m x_i + a_2 \sum_{i=1}^m x_i^2 + a_3 \sum_{i=1}^m x_i^3 = \sum_{i=1}^m y_i \dots\dots\dots (2.14)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial S}{\partial a_1} = 0 &= 2(a_0 + a_1x_1 + a_2x_1^2 + a_3x_1^3 - y_1)(x_1) + 2(a_0 + a_1x_2 + a_2x_2^2 + a_3x_2^3 - y_2)(x_2) \\ &+ \dots + (a_0 + a_1x_i + a_2x_i^2 + a_3x_i^3 - y_i)(x_i) + \dots + (a_0 + a_1x_m + a_2x_m^2 + a_3x_m^3 - y_m)(x_m) \end{aligned}$$

memberikan :

$$a_0 \sum_{i=1}^m x_i + a_1 \sum_{i=1}^m x_i^2 + a_2 \sum_{i=1}^m x_i^3 + a_3 \sum_{i=1}^m x_i^4 = a_0 \sum_{i=1}^m x_i y_i \dots\dots\dots (2.15)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial S}{\partial a_3} = 0 &= 2(a_0 + a_1x_1 + a_2x_1^2 + a_3x_1^3 - y_1)(x_1^2) + 2(a_0 + a_1x_2 + a_2x_2^2 + a_3x_2^3 - y_2)(x_2^2) \\ &+ \dots + (a_0 + a_1x_i + a_2x_i^2 + a_3x_i^3 - y_i)(x_i^2) + \dots + (a_0 + a_1x_m + a_2x_m^2 + a_3x_m^3 - y_m)(x_m^2) \end{aligned}$$

memberikan :

$$a_0 \sum_{i=1}^m x_i^2 + a_1 \sum_{i=1}^m x_i^3 + a_2 \sum_{i=1}^m x_i^4 + a_3 \sum_{i=1}^m x_i^5 = a_0 \sum_{i=1}^m x_i^2 y_i \dots\dots\dots (2.16)$$

$$\frac{\partial S}{\partial a_3} = 0 = 2(a_0 + a_1x_1 + a_2x_1^2 + a_3x_1^3 - y_1)(x_1^3) + 2(a_0 + a_1x_2 + a_2x_2^2 + a_3x_2^3 - y_2)(x_2^3) + \dots + (a_0 + a_1x_i + a_2x_i^2 + a_3x_i^3 - y_i)(x_i^3) + \dots + (a_0 + a_1x_m + a_2x_m^2 + a_3x_m^3 - y_m)(x_m^3)$$

memberikan :

$$a_0 \sum_{i=1}^m x_i^3 + a_1 \sum_{i=1}^m x_i^4 + a_2 \sum_{i=1}^m x_i^5 + a_3 \sum_{i=1}^m x_i^6 = a_0 \sum_{i=1}^m x_i^3 y_i \dots \dots \dots (2.17)$$

Terlihat turunan parsial fungsi S memberikan empat persamaan dengan empat variabel yang tidak diketahui. Persamaan ini disebut persamaan normal yang merupakan persamaan linear simultan.

$$\begin{bmatrix} m & \sum_{i=1}^m x_i & \sum_{i=1}^m x_i^2 & \sum_{i=1}^m x_i^3 \\ \sum_{i=1}^m x_i & \sum_{i=1}^m x_i^2 & \sum_{i=1}^m x_i^3 & \sum_{i=1}^m x_i^4 \\ \sum_{i=1}^m x_i^2 & \sum_{i=1}^m x_i^3 & \sum_{i=1}^m x_i^4 & \sum_{i=1}^m x_i^5 \\ \sum_{i=1}^m x_i^3 & \sum_{i=1}^m x_i^4 & \sum_{i=1}^m x_i^5 & \sum_{i=1}^m x_i^6 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} a_0 \\ a_1 \\ a_2 \\ a_3 \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \sum_{i=1}^m y_i \\ \sum_{i=1}^m x_i y_i \\ \sum_{i=1}^m x_i^2 y_i \\ \sum_{i=1}^m x_i^3 y_i \end{Bmatrix} \dots \dots \dots (2.18)$$

Secara umum, dengan prosedur yang serupa, jika fungsi dekatan dinyatakan dalam polinomial derajat n, maka polinomial diselesaikan dari (n+1) persamaan linear simultan.

$$\begin{bmatrix} m & \sum_{i=1}^m x_i & \sum_{i=1}^m x_i^2 & \sum_{i=1}^m x_i^3 & \dots & \sum_{i=1}^m x_i^2 \\ \sum_{i=1}^m x_i^2 & \sum_{i=1}^m x_i^2 & \sum_{i=1}^m x_i^3 & \sum_{i=1}^m x_i^4 & \dots & \sum_{i=1}^m x_i^2 \\ \sum_{i=1}^m x_i^2 & \sum_{i=1}^m x_i^3 & \sum_{i=1}^m x_i^4 & \sum_{i=1}^m x_i^5 & \dots & \sum_{i=1}^m x_i^2 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \sum_{i=1}^m x_i^n & \sum_{i=1}^m x_i^{n+1} & \sum_{i=1}^m x_i^{n+2} & \sum_{i=1}^m x_i^{n+3} & \dots & \sum_{i=1}^m x_i^{2n} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} a_0 \\ a_1 \\ a_2 \\ \dots \\ a_n \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \sum_{i=1}^m y_i \\ \sum_{i=1}^m x_i y_i \\ \sum_{i=1}^m x_i^2 y_i \\ \dots \\ \sum_{i=1}^m x_i^n y_i \end{Bmatrix} (2.19)$$

### 2.8.3. Regresi Linear

Regresi linear diperoleh untuk derajat satu polynomial. Penentuan koefisien dari m – data adalah persamaan linear

$$\begin{bmatrix} m & \sum_{i=1}^m x_i \\ \sum_{i=1}^m x_i & \sum_{i=1}^m x_i^2 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} a_0 \\ a_1 \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \sum_{i=1}^m y_i \\ \sum_{i=1}^m x_i y_i \end{Bmatrix} \quad (2.20)$$

Penyelesaian persamaan ini untuk memperoleh  $a_0$  dan  $a_1$  adalah

$$a_0 = \frac{\sum_{i=1}^m y_i \sum_{i=1}^m x_i^2 - \sum_{i=1}^m x_i \sum_{i=1}^m x_i y_i}{m \sum_{i=1}^m x_i^2 - \left\{ \sum_{i=1}^m x_i \right\}^2} \quad (2.21)$$

$$a_1 = \frac{m \sum_{i=1}^m x_i y_i - \sum_{i=1}^m x_i \sum_{i=1}^m y_i}{m \sum_{i=1}^m x_i^2 - \left\{ \sum_{i=1}^m x_i \right\}^2} \quad (2.22)$$

Koefisien  $a_0$  dapat lebih sederhana dirumuskan dari persamaan  $ma_0 + a_1 \sum_{i=1}^m x_i$ , yaitu

$$a_0 = \frac{\sum_{i=1}^m y_i - a_1 \sum_{i=1}^m x_i}{m} = \bar{y} - a_1 \bar{x} \quad (2.23)$$

dengan :

m : Jumlah data

$x_1, y_1$  : pasangan data

$\bar{x}, \bar{y}$  : nilai rata-rata x dan y

Regresi linear dapat digunakan untuk mencari koefisien dari pemodelan fungsi dekatan eksponensial atau fungsi pangkat tertentu. Jika model fungsi eksponensial dinyatakan sebagai  $y = ae^{bx}$ , maka linearisasi diperoleh dengan mengubah persamaan dalam bentuk logaritma sebagai  $\ln(y) = \ln(a) + bx$ . Dengan menetapkan  $Y = \ln(y)$ , dan  $A = \ln(a)$ ,  $B = b$ ; dan  $x = X$ , maka persamaan logaritma eksponensial mengambil bentuk serupa dengan persamaan linear

$$Y = A + BX$$

Koefisien A dan B dapat ditentukan berdasarkan data yang diberikan. Dengan proses antilogaritma didapat nilai a, sehingga koefisien fungsi eksponensial sesungguhnya dapat diperoleh.

Koefisien A dan B dapat ditentukan berdasarkan data yang diberikan. Dengan proses antilogaritma didapat nilai a, sehingga koefisien fungsi eksponensial sesungguhnya dapat diperoleh.

#### 2.8.4. Korelasi

Sampai saat ini dianggap bahwa peubah bebas  $x$  dikendalikan, jadi bukan suatu peubah acak. Sebetulnya dalam hal ini,  $x$  sering disebut **peubah matematika**, yang dalam proses pengambilan sampel diukur tanpa galat yang berarti. Dalam banyak penggunaan teknik regresi lebih wajar bila dianggap bahwa  $X$  dan  $Y$  keduanya merupakan peubah acak dan pengukuran  $\{(x_i, y_i; i = 1, 2, \dots, n)\}$  merupakan pengamatan yang berasal dari populasi yang mempunyai fungsi padat gabungan  $f(x, y)$ . Kita ingin memandang permasalahan mengukur hubungan antara kedua peubah  $X$  dan  $Y$ . **Analisis korelasi** berusaha mengukur eratnya hubungan antara dua peubah dengan menggunakan suatu bikangan yang disebut **koefisien korelasi**.

**Koefisien korelasi** ukuran hubungan linear  $\rho$  antara dua peubah  $X$  dan  $Y$  ditaksir dengan **koefisien korelasi sampel**  $r$  dengan

$$r = b \sqrt{\frac{J_{xx}}{J_{yy}}} = \frac{J_{xy}}{\sqrt{J_{xx} J_{yy}}} \dots \dots \dots (2.24)$$

$$J_{xx} = \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 = \sum_{i=1}^n x_i^2 - \frac{\left(\sum_{i=1}^n x_i\right)^2}{n} \quad (2.25)$$

$$J_{yy} = \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2 = \sum_{i=1}^n y_i^2 - \frac{\left(\sum_{i=1}^n y_i\right)^2}{n} \quad (2.26)$$

$$J_{xy} = \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y}) = \sum_{i=1}^n x_i y_i - \frac{\left(\sum_{i=1}^n x_i\right)\left(\sum_{i=1}^n y_i\right)}{n} \quad (2.27)$$

Nilai  $r$  antara -1 dan +1 perlu ditafsirkan dengan berhati-hati. Sebagai contoh, nilai  $r$  sebesar 0,3 dan 0,6 hanya berarti bahwa kedua korelasi itu positif, yang satu lebih erat dari yang lainnya. Tidak dapat diartikan bahwa  $r = 0,6$  menunjukkan hubungan linear yang kedua kali lebih erat daripada yang diberikan oleh nilai  $r = 0,3$ .

Sebaliknya bila ditulis :

$$r^2 = \frac{J_{xy}^2}{J_{xx}J_{yy}} = \frac{JKR}{J_{yy}} \quad (2.28)$$

Maka  $r^2$ , yang biasa disebut dengan **koefisien penentu sampel**, menyatakan proporsi variasi  $J_{yy}$  yang diterangkan oleh regresi  $Y$  pada  $x$ , yakni,  $JKR$ . Jadi  $r^2$  menyatakan proporsi variasi keseluruhan dalam nilai peubah  $Y$  yang dapat diterangkan atau diakibatkan oleh hubungan linear dengan nilai peubah acak  $X$ . Jadi korelasi sebesar 0,6 berarti bahwa 0,36 atau 36 % dari variasi total (keseluruhan) dalam nilai  $Y$ . Jadi korelasi sebesar 0,3 berarti bahwa 0,09 atau 9 % dari variasi total (keseluruhan) dalam nilai  $Y$  pada sampel disebabkan oleh hubungan linear dengan nilai  $X$ .

### 2.8.5. Analisa Hasil

Data dan analisa hasil yang di peroleh dari percobaan test marshall adalah sebagai berikut:

- 1) Berat benda uji sebelum direndam dalam air (gram)
- 2) Berat benda uji dalam keadaan jenuh air (gram)
- 3) Berat dalam air (gram)
- 4) Pembacaan arloji stabilitas
- 5) pembacaan arloji kelelehan atau flow (mm)

Untuk memperoleh nilai VIM (persen rongga dalam campuran), VFA (persen rongga terisi aspal), Stabilitas (ketahanan), Flow (kelelehan), serta QM diperlukan data-data sebagai berikut:

1. Berat jenis aspal ( $B_{ja}$ ) :

$$B_{ja} = \frac{\text{Berat aspal (gram)}}{\text{Isi aspal (cc)}} = \text{gr / cc} \quad \dots\dots\dots (2.29)$$

2. Berat jenis Bulk Agregat campuran (BSGacmp) :

$$BSGacmp = \frac{100}{\left(\frac{X}{F1} + \frac{Y}{F2}\right)} = gr / cc \quad \dots\dots\dots (2.30)$$

X = % Agregat Kasar

Y = % Agregat Halus

F1 = BSG Agregat Kasar

F2 = BSG Agregat Halus

3. Berat jenis Efektif Agregat campuran (ESGacmp) :

$$ESGacmp = \frac{100}{\left(\frac{X}{F1} + \frac{Y}{F2}\right)} = gr / cc \quad \dots\dots\dots (2.31)$$

X = % Agregat Kasar

Y = % Agregat Halus

F1 = ESG Agregat Kasar

F2 = ESG Agregat Halus

$$ESG = \frac{(BSG) + (ASG)}{2} \quad \dots\dots\dots (2.32)$$

ESG = Berat Jenis Efektif

BSG = Berat Jenis Curah (Bulk Specific Gravity)

ASG = Berat Jenis Semu (Apprent Spesific Gravity)

4. VIM (Void In the Mix)

$$VIM = \left(1 - \left[\frac{BSG \text{ Campuran}}{BSG \text{ Max}}\right]\right) \cdot 100 \% \quad \dots\dots\dots (2.33)$$

g = Berat Isi Benda Uji

h = Berat Maximum teoritis

a. Presentase aspal terhadap campuran dihitung dengan rumus :

$$Pers \text{ aspal terhadap camp} = c = \frac{a}{b + a} \times 100 \% \quad \dots\dots\dots (2.34)$$

c = % aspal terhadap campuran

a = berat aspal

b = berat aggregate campuran

b. Volume benda uji dihitung dengan rumus :

$$h = f - g \dots\dots\dots (2.35)$$

f = berat dalam keadaan jenuh (gram)

g = berat dalam air (gram)

h = volume (cc)

c. Berat isi benda uji :

$$BSG_{bu} = i = \frac{e}{h} \dots\dots\dots (2.36)$$

e = berat benda uji sebelum direndam (gram)

h = volume (cc)

i = berat isi benda uji (BSGbu)

d. Berat jenis maksimum teoritis dihitung dengan rumus:

$$BSG_{bu \text{ max teoritis}} = h = \frac{100}{\left[ \frac{\% \text{ Agregat}}{BSG_{acmp}} + \frac{\% \text{ Aspal}}{BSG_{aspal}} \right]} \dots\dots\dots (2.37)$$

h = berat maksimum teoritis benda uji (BSGbumax)

e. VMA

$$VMA = 100 - \frac{(100 - a) \cdot i}{BSG_{acmp}} \dots\dots\dots (2.38)$$

a = Kadar aspal terhadap campuran (%)

i = BSG Benda uji

5. VFA (Void Filled with Asphalt)

$$VFA = 100 \times \frac{a \times \frac{i}{Bj_{Aspal}}}{VMA} \dots\dots\dots (2.39)$$

## 6. Nilai Stabilitas

Angka stabilitas ini masih harus dikoreksi untuk memasukkan nilai kalibrasi alat dan koreksi ketebalan benda uji dengan menggunakan angka koreksi benda uji seperti yang tercantum pada tabel 2.2.

Untuk kalibrasi atau nilai stabilitas (STA) diperoleh dengan rumus:

$$STA = P \times A \times \text{Koreksi tebal benda uji} \dots\dots\dots (2.40)$$

P = pembacaan arloji stabilitas

A = Kalibrasi Alat = 1,26

## 7. Nilai Kelelahan (flow)

Nilai kelelahan (flow) diperoleh dari pembacaan arloji kelelahan (flow meter) dalam satuan 0,01 mm.

## 8. Marshall Quotient

$$MQ = \frac{\text{Stabilitas (Kg)}}{\text{Flow (mm)}} \dots\dots\dots (2.41)$$

Tabel 2.3. Angka Koreksi Stabilitas (Marshall)

Tebal (mm)	Angka Koreksi	Tebal (mm)	Angka Koreksi
60	1,095	70	0,845
61	1,065	71	0,835
62	1,035	72	0,825
63	1,015	73	0,810
64	0,960	74	0,791
65	0,935	75	0,772
66	0,900	76	0,762
67	0,885	77	0,752
68	0,865	78	0,742
69	0,855	79	0,733
70	0,845	80	0,724

Sumber : SK SNI M-58-1990-03.