



# Model Konstitutif Modulus Kekakuan Resilien *Cement Treated Asphalt Mixture*

Oleh :  
**R. Anwar Yamin**

## **RINGKASAN**

Metode perencanaan tebal perkerasan secara mekanistik memungkinkan penggunaan berbagai jenis bahan untuk perkerasan jalan. *Cement Treated Asphalt Mixture (CTAM)* adalah suatu lapisan permukaan perkerasan jalan yang merupakan campuran komposit yang terdiri dari agregat-aspal dan semen. CTAM dibuat dari campuran beraspal bergradasi terbuka dengan mortar semen sebagai bahan pengisi rongga udaranya sehingga membentuk suatu campuran baru yang bersifat unik. Sejauh ini CTAM kurang populer digunakan karena belum tersedianya grafik ataupun model konstitutif atau matematis yang dapat digunakan untuk memprediksi besarnya modulus kekakuan resilien CTAM ( $S_{CTAM}$ ). Tujuan dari penelitian ini adalah untuk membuat suatu model konstitutif yang dapat digunakan untuk memprediksi  $S_{CTAM}$ . Untuk mencapai tujuan tersebut dilakukan percobaan di laboratorium dengan menguji modulus kekakuan resilien dan parameter lain CTAM yang dibuat dari tiga jenis aspal yaitu aspal minyak pen 60 (AM), campuran AM dengan 3% latek tipe KKK-60 (AK) dan campuran AM dengan asbuton jenis Retona-60 dalam perbandingan 4 : 1 (AA) dan mortar dengan kuat tekan yang berbeda. Pengujian ini dilakukan pada rentang elastis CTAM di bawah tiga temperatur yang berbeda. Model konstitutif  $S_{CTAM}$  diformulasikan sebagai fungsi faktor-faktor yang mempengaruhinya, yaitu modulus kekakuan ( $S_{bit}$ ), kuat tekan mortar ( $K$ ), kadar aspal ( $KA$ ), rongga udara CTAM ( $VIM_{CTAM}$ ), rongga terisi mortar ( $VFM_{CTAM}$ ) dan temperatur ( $T$ ). Dengan menggunakan data tersebut didapatkan model konstitutif  $S_{CTAM}$  yang cukup layak digunakan.

## **SUMMARY**

Design thickness of pavement by mechanistic method may allow use of many types of pavement materials. *Cement Treated Asphalt Mixture (CTAM)* is one type of pavement surfacing layer which is a composite mixture consist of aggregates, asphalt and mortar cement. CTAM made from open graded and mortar cement as air void grouting agent resulted a new type of asphaltic mixture with a unique characteristic. So far, use of CTAM is not too popular since its chart or constitutive model for determination of its stiffness modulus is not available yet. The aim of this study was to formulate the constitutive models of stiffness modulus of CTAM ( $S_{CTAM}$ ). For meet this purpose, a laboratory experiment using CTAM made by varied types of asphalt; petroleum asphalt Pen 60 (AM), AM plus 3% latex type KKK-60 and AM plus Asbuton type of Retona-60 by ratio 4 : 1 (AA), three different of compressive strength of mortar cement. This test was conducted in elastic range of CTAM on three different temperatures. Constitutive models of  $S_{CTAM}$  was formulate as a function of its affecting factor i.e. stiffness modulus of asphalt ( $S_{bit}$ ), compressive strength of mortar ( $K$ ), asphalt content ( $KA$ ), void in mix of CTAM ( $VIM_{CTAM}$ ), void filled by mortar ( $VFM_{CTAM}$ ) and temperature ( $T$ ). By use of 681 data, a quite feasible constitutive models  $S_{CTAM}$  was derived

## **I. PENDAHULUAN**

### **1.1. Latar Belakang**

Metoda mekanistik adalah salah satu metoda yang dapat digunakan tidak saja dalam perencanaan campuran beraspal tetapi juga dapat digunakan untuk memprediksi kinerja dari campuran tersebut. Perkembangan metoda ini didukung oleh perkembangan teknologi pengujian dilaboratorium dan didukung juga oleh perkembangan metoda perencanaan tebal

perkerasan secara analitis. Dalam metoda mekanistik ini, sifat campuran diwakili oleh dua parameter yaitu modulus kekakuan resilien dan angka Poisson. Kedua parameter ini adalah paramater utama yang sangat menentukan mulai dari saat perencanaan campuran, perencanaan tebal perkerasan sampai evaluasi kinerjanya selama masa pelayanan.

*Cement Treated Asphalt Mixture (CTAM)* adalah suatu lapisan permukaan perkerasan jalan yang dibuat secara komposit antara agregat-aspal dan

semen. Dalam hal tersebut, campuran beraspal mempunyai bergradasi yang terbuka dimana rongga udaranya diisi dengan mortar semen sehingga membentuk suatu campuran baru yang bersifat unik. Sejauh ini CTAM kurang populer digunakan karena belum tersedianya chart atau model yang dapat digunakan untuk memprediksi besarnya modulus kekakuan CTAM ( $S_{CTAM}$ ).

### 1.2. Tujuan Penelitian

Tujuan dari penelitian ini adalah untuk membuat suatu model konstitutif yang dapat digunakan untuk memprediksi besarnya  $S_{CTAM}$ .

### 1.3. Ruang Lingkup

Penelitian ini hanya mencakup pengujian modulus kekakuan resilien dan parameter lain yang mempengaruhi di laboratorium terhadap CTAM yang dibuat dengan menggunakan tiga jenis aspal, yaitu aspal minyak pen 60 (AM), campuran AM dengan 3% latek tipe KKK-60 (AK) dan campuran AM dengan asbuton jenis Retona-60 dengan perbandingan 4 : 1 (AA), tiga jenis mortar dengan kuat tekan dan volume pengisian yang berbeda dan pengujian diuji modulus kekakuan resilien CTAM-nya dilakukan pada tiga temperatur yang berbeda.

## II. KAJIAN PUSTAKA

### 2.1. Modulus Kekakuan Campuran Beraspal

Campuran beraspal adalah suatu material yang dapat bersifat viskos sampai elastis. Sifat ini tergantung pada waktu pembebanan, temperatur, sifat dan kadar aspal, tipe agregat dan gradasi, kepadatan dan rongga udara yang terkandung dalam campuran tersebut. Oleh karena itu, respon campuran terhadap tegangan yang diberikan dapat dengan jelas bila digambarkan oleh modulus kekakuannya, yaitu rasio hubungan antara tegangan dengan regangan. Seperti halnya aspal, hubungan ini sangat dipengaruhi oleh waktu pembebanan dan temperatur. Oleh sebab itu, modulus kekakuan dinyatakan sebagai fungsi

$$S_{(t,T)} = f(\text{tegangan/regangan})_{t,T}$$

Dalam analisa elastisitas, komponen elastis dari perilaku dinamis ini dibedakan dengan komponen viskosnya dan dinyatakan sebagai modulus resilien.

Nilai minimum modulus kekakuan aspal untuk analisa elastis adalah 5 MPa (Bonnaure et al. 1977, Brown, et al., 1982). Di atas nilai ini, modulus kekakuan campuran hanya ditentukan oleh modulus kekakuan aspal dan sifat volumetrik campuran. Bila modulus kekakuan aspal yang digunakan lebih kecil dari 5 MPa, pengaruhnya terhadap penentuan modulus kekakuan campuran

beraspal akan kecil. Dalam hal ini, modulus kekakuan campuran beraspal lebih ditentukan oleh parameter-parameter lain yang berhubungan dengan sifat dan proporsi bahan-bahan pembentuknya.

Sehubungan dengan modulus kekakuan campuran beraspal, ada beberapa istilah yang biasanya digunakan (Huang, 1993), yaitu modulus kekakuan resilien (*resilient stiffness modulus*), modulus kekakuan kompleks dinamis (*dynamic complex stiffness modulus*), modulus kekakuan dinamis (*dynamic stiffness modulus*) dan modulus kekakuan lentur dinamis (*dynamic flexural stiffness modulus*). Perbedaan istilah atau nama modulus ini dikarenakan perbedaan jenis pengujian, bentuk dan waktu pembebanan, dan bentuk benda ujinya. Dari semua jenis modulus yang ada, modulus resilienlah yang populer digunakan baik untuk perencanaan, peningkatan ataupun untuk evaluasi struktur perkerasan jalan (Jamal et al. 1991).

### 2.2. Modulus Kekakuan Resilien Campuran Beraspal

Modulus kekakuan resilien adalah modulus elastis yang digunakan dalam teori elastis. Seperti diketahui bahwa, kebanyakan material untuk perkerasan jalan tidak bersifat elastis karena setelah menerima pengulangan beban material ini akan mengalami deformasi permanen. Tetapi pada beban berulang yang relatif kecil deformasi permanen yang terjadi pada masing-masing pengulangan beban hampir dapat balik secara sempurna (*nearly complete recoverable*) dan proporsional terhadap beban. Pada kondisi ini material tersebut dapat dipertimbangkan sebagai material yang elastis.

Pengujian modulus kekakuan resilien dapat dilakukan dengan uji triaxial (*creep test*) atau uji tarik tak langsung. Beberapa jenis pembebanan dengan waktu jeda dapat digunakan pada kedua uji ini. Pada uji triaxial, benda uji diletakkan secara aksial dan dibebani secara aksial pula. Sedangkan pada uji tarik tak langsung, benda uji diletakkan pada posisi diametrikal dan pembebanan dilakukan pada sumbu vertikal sepanjang panjang benda uji dengan menggunakan batang pembeban yang bagian bawahnya berbetuk lengkung dengan diameter yang sama dengan diameter benda uji.

### 2.3. Pembuatan Benda Uji CTAM

Campuran aspal porus yang digunakan untuk pembuatan CTAM dibuat dengan tiga variasi jenis aspal yang memiliki modulus kekakuan ( $S_{bit}$ ) pada kadar aspal optimumnya. Jenis gradasi dan metode penentuan kadar aspal optimum campuran aspal porus yang digunakan untuk pembuatan CTAM telah disampaikan pada kesempatan terdahulu (Yamin et al., 2002.a). Mortar yang digunakan dibuat dengan

menggunakan semen, abu terbang, pasir, air dan aditif. Komposisi pemakaian dari bahan-bahan ini didapat dari penelitian sebelumnya Yamin et al. (2002,b). Selanjutnya benda uji CTAM dibuat dengan memasukan mortar tersebut secara gravitasi. Kuantitas mortar yang digunakan diatur sedemikian hingga sehingga didapatkan benda uji CTAM dengan persentase kandungan rongga yang diinginkan.

#### 2.4. Pengujian Modulus Kekakuan Resilien CTAM

Dalam penelitian ini, modulus kekakuan resilien CTAM diuji dengan metoda uji tarik tak langsung. Pengujian dilakukan pada kondisi seperti yang diberikan pada Tabel 1.

Variasi temperatur pengujian modulus kekakuan resilien yang digunakan dalam penelitian ini adalah variasi temperatur maksimum, nilai tengah dan temperatur maksimum perkerasan di Indonesia sehubungan dengan temperatur udara minimum dan maksimumnya (Yamin et al., 2003). Periode pembebanan yang digunakan adalah periode pembebanan dimana CTAM masih dalam rentang elastisnya (Yamin et al., 2003). Hasil pengujian modulus kekakuan resilien yang didapat merupakan nilai rata-rata dari lima kali pengukuran pada setiap benda uji yang dihitung secara otomatis oleh komputer pada saat uji modulus dilakukan.

Tabel 1.  
Kondisi Pengujian Modulus Kekakuan Resilien CTAM

Kondisi Pengujian CTAM			
Temperatur, °C	25	37,5	50
Beban puncak, Newton	2500	1500	1000
Periode pembebanan ( <i>pulse period</i> ), 10 <sup>-3</sup> detik	4000	4000	4000
Waktu pencapaian beban puncak ( <i>rise time</i> ), 10 <sup>-3</sup> detik	60	60	60
Angka Poisson	0,25	0,25	0,25

#### 2.5. Faktor yang Mempengaruhi Modulus Kekakuan Resilien CTAM ( $S_{CTAM}$ )

Campuran beraspal adalah suatu material yang dapat bersifat viskos sampai elastis. Sifat ini tergantung pada waktu pembebanan, temperatur, sifat dan kadar aspal, tipe agregat dan gradasi, kepadatan dan rongga udara yang terkandung dalam campuran tersebut. Oleh karena itu, respon campuran terhadap tegangan yang diberikan dapat dengan jelas bila digambarkan oleh modulus kekakuannya ( $S_{i,T}$ ) yaitu rasio hubungan antara tegangan dengan regangan. Sebagai campuran yang juga mengandung aspal, sifat elastisitas CTAM juga tergantung atau dipengaruhi oleh banyak faktor seperti halnya campuran beraspal. Dari hasil penelitiannya terdahulu Yamin (2004) telah menunjukkan faktor-

faktor yang mempengaruhi modulus kekakuan resilien CTAM ( $S_{CTAM}$ ). Faktor-faktor tersebut adalah faktor-faktor yang mempengaruhinya, yaitu modulus kekakuan ( $S_{bit}$ ), kuat tekan mortar (K), kadar aspal (KA), rongga udara CTAM ( $VIM_{CTAM}$ ), rongga terisi mortar ( $VFM_{CTAM}$ ) dan temperatur (T). Dari penelitiannya ini ia menyimpulkan bahwa pengaruh faktor-faktor tersebut secara individual terhadap  $S_{CTAM}$  adalah seperti yang ditunjukkan pada Tabel 2.

Tabel 2.  
Faktor-faktor yang Mempengaruhi  $S_{CTAM}$  (Yamin, 2004)

Kriteria Faktor	Faktor	Perubahan Faktor	Pengaruh perubahan faktor pada $S_{CTAM}$
Aspal	Modulus kekakuan aspal ( $S_{bit}$ )	Meningkat	Meningkat
Mortar	Kuat tekan mortar (K)	Meningkat	Meningkat
Volumetrik CTAM	Kadar aspal (KA)	Meningkat	Menurun*
	Rongga udara CTAM ( $VIM_{CTAM}$ )	Meningkat	Menurun
Kondisi Pengujian	Rongga terisi mortar ( $VFM_{CTAM}$ )	Meningkat	Meningkat
	Temperatur (T)	Meningkat	Menurun

Catatan : \* Tidak begitu nyata terlihat dalam hasil penelitian ini

### III. HASIL PENELITIAN

Dari Tabel 2 dapat dilihat bahwa secara garis besar modulus kekakuan resilien CTAM ( $S_{CTAM}$ ) sangat dipengaruhi oleh sifat bahan, volumetrik dari CTAM itu sendiri dan kondisi pengujian. Dalam penelitian ini sifat bahan diwakili oleh modulus kekakuan ( $S_{bit}$ ) dan kuat tekan mortar (K), sedangkan sifat volumetrik CTAM diwakili oleh kadar aspal (KA), rongga udara CTAM ( $VIM_{CTAM}$ ) dan rongga terisi mortar ( $VFM_{CTAM}$ ). Untuk kondisi pengujian, karena semua pengujian yang dilakukan pada penelitian ini hanya menggunakan satu nilai frekwensi tetapi pada temperatur yang bervariasi, maka hanya temperatur (T) saja yang diambil sebagai faktor yang mewakili kondisi pengujian. Bertitik tolak hal ini, model konstitutif  $S_{CTAM}$  yang diturunkan dari penelitian ini merupakan fungsi  $S_{bit}$ , K, KA,  $VIM_{CTAM}$ ,  $VFM_{CTAM}$  dan temperatur (T), yaitu :

$$S_{CTAM} = f(S_{bit}, K, KA, VIM_{CTAM}, VFM_{CTAM}, T) \quad (2)$$

Dengan pertimbangan bahwa temperatur (T) dan modulus kekakuan resilien aspal ( $S_{bit}$ ) adalah dua faktor yang selalu berubah, sedangkan faktor lainnya seperti K, KA,  $VIM_{CTAM}$  dan  $VFM_{CTAM}$  relatif tetap maka kedua faktor ini dijadikan sebagai faktor interaksi dari faktor-faktor yang mempengaruhi  $S_{CTAM}$ . Dengan pertimbangan tersebut, secara linier model konstitutif  $S_{CTAM}$  dari Persamaan 2 dapat diformulasikan menjadi :

$$S_{CTAM} = \psi_0 * S_{bit} + \psi_1 * K + \psi_2 * KA + \psi_3 * VIM_{CTAM} + \psi_4 * VFM_{CTAM} + \psi_5 * T * K + \psi_6 * (T * S_{bit}) + \psi_7 * (T * K) + \psi_8 * (T * KA) + \psi_9 * (T * VIM_{CTAM}) + \psi_{10} * (T * VFM_{CTAM}) + \psi_{11} * (S_{bit} * K) + \psi_{12} * (S_{bit} * KA) + \psi_{13} * (S_{bit} * VIM_{CTAM}) + \psi_{14} * (S_{bit} * VFM_{CTAM}) + \psi_{15} \dots(3)$$

Untuk mendapatkan nilai  $\psi$  dari Persamaan 3 di atas, dilakukan analisis statistik. Analisis ini bertujuan juga untuk mengetahui sensitivitas variabel bebas (*independent variables*) terhadap variabel terikat (*dependent variables*) dari parameter CTAM. Suatu asumsi penting dalam analisis statistik khususnya dalam melakukan analisis varian (*analysis of variance*, ANOVA) dan pemodelan linier (*linier modeling*) adalah variabel terikat dengan variabel bebas terdistribusi normal. Untuk data yang jumlahnya banyak (lebih dari 30) kenormalan data tidak perlu diuji karena secara statistik data tersebut dapat dianggap normal sehingga tidak perlu dilakukan uji kenormalan lagi. Dalam penelitian ini, analisis varian dan pemodelan  $S_{CTAM}$  dilakukan dengan menggunakan 681 data, oleh sebab itu uji kenormalan data tidak dilakukan. Korelasi  $S_{CTAM}$  dengan variabel-variabel CTAM dalam Persamaan 3 dicari dengan menggunakan ANOVA dan pemodelannya dilakukan secara linier serta non linier dengan analisis regresi.

Dari analisis statistik semua nilai  $\psi$  dari Persamaan 3 dapat diketahui, yaitu seperti yang diberikan dalam Tabel 3. Dengan memasukan nilai  $\psi$  dari tabel ini untuk masing-masing variabel dalam Persamaan 3 maka didapat model konstitutif  $S_{CTAM}$  seperti yang ditunjukkan pada Persamaan 4 dengan nilai  $R^2 = 0,840$ .

**Tabel 3.**  
**Nilai Koefisien Variabel  $S_{CTAM}$  dari Persamaan 3**

Koefisien ( $\psi$ )	Nilai
$\psi_0$	0
$\psi_1$	40,589
$\psi_2$	- 12746,1
$\psi_3$	4924,118
$\psi_4$	1394,35
$\psi_5$	0
$\psi_6$	- 145,257
$\psi_7$	- 0,939
$\psi_8$	8,304
$\psi_9$	16,089
$\psi_{10}$	0
$\psi_{11}$	- 17,661
$\psi_{12}$	2381,928
$\psi_{13}$	373,302
$\psi_{14}$	- 18,243
$\psi_{15}$	- 93806,1

$$S_{CTA} = 40,589 * K - 12746,1 * KA + 4924,118 * VIM_{CTAM} + 1394,350 * VFM_{CTAM} + 8,304 * T * KA - 0,939 * T * K + 16,089 * T * VIM_{CTAM} - 145,257 * T * S_{bit} + 2381,928 * S_{bit} * K - 17,661 * S_{bit} * KA + 373,302 * S_{bit} * VIM_{CTAM} - 18,243 * S_{bit} * VFM_{CTAM} - 93806 \quad (4)$$

Setelah nilai  $\psi$  didapat, dilakukan uji t dan uji signifikansi dari variabel-variabel dalam Persamaan 4, hasil dari uji ini diberikan dalam Tabel 4. Dari tabel ini dapat dilihat bahwa ada beberapa variabel dalam Persamaan 4 yang pada tingkat kepercayaan 95% dan derajat kebebasan 12 memiliki nilai t lebih besar dari nilai t yang terdapat dalam tabel t untuk uji dua sisi (*two tails*). Variabel-variabel ini dapat pula diketahui dengan melihat nilai signifikansinya. Untuk tingkat kepercayaan 95%, variabel yang memiliki nilai signifikansi lebih besar dari 0,05 adalah variabel yang tidak penting.

**Tabel 4.**  
**Nilai Signifikasi Variabel Dalam Persamaan 4**

Variabel	t Tes	Nilai signifikansi
$S_{CTAM}$	299,139	0,000
K	2,446	0,015
KA	- 5,791	0,000
$VIM_{CTAM}$	6,643	0,000
$VFM_{CTAM}$	9,584	0,000
$T * KA$	0,273	0,785
$T * K$	- 2,646	0,008
$T * VIM_{CTAM}$	1,965	0,050
$T * S_{bit}$	- 3,019	0,003
$S_{bit} * K$	- 3,441	0,001
$S_{bit} * KA$	1,756	0,080
$S_{bit} * VIM_{CTAM}$	1,682	0,093
$S_{bit} * VFM_{CTAM}$	- 0,362	0,718
Konstan	- 9,798	0,000

Untuk menyederhanakan Persamaan 4, variabel -variabel yang tidak penting, yaitu variabel dari Tabel 4 yang memiliki nilai signifikansi lebih besar dari 0,5, dapat dikeluarkan dari persamaan tersebut. Persamaan 5 dengan nilai  $R^2 = 0,820$  adalah penyederhanaan dari Persamaan 4 dengan mengeluarkan variabel tidak penting dari persamaannya.

$$S_{CTA} = 5,229 * K - 8355,169 * KA + 5118,362 * VIM_{CTAM} + 1211,19 * VFM_{CTAM} - 0,415 * T * K - 43,188 * T * S_{bit} + 5,401 * S_{bit} * K - 87192 \quad (5)$$

Analisis lebih lanjut dari variabel dalam Persamaan 5 ini diketahui bahwa untuk tingkat kepercayaan 95%, variabel  $T * S_{bit}$  dalam persamaan tersebut memiliki nilai signifikansi 0,076 (lebih besar dari 0,05) sehingga dapat dianggap sebagai faktor yang tidak penting dalam persamaan tersebut. Dengan mengeluarkan variabel  $T * S_{bit}$  dari Persamaan 5 di dapat Persamaan 6 atau Persamaan 7 dengan nilai  $R^2 =$

0,819 dengan nilai estimasi kesalahan standar (*standard error of the estimate*) sebesar 865. Variabel-variabel dalam Persamaan 6 atau Persamaan 7 ini memiliki nilai signifikansi di bawah 0,05 seperti yang ditunjukkan pada Tabel 5.

$$S_{CTA} = -6984,86 * KA + 5,603 * K + 4757,352 * VIM_{CTAM} + 1124,017 * VFM_{CTAM} - 0,381 * T * K + 2,768 * S_{bit} * K - 83804 \quad (6)$$

Atau

$$S_{CTA} = -6984,86 * KA + (5,603 - 0,381 * T) * K + 4757,352 * VIM_{CTAM} + 1124,017 * VFM_{CTAM} + 2,768 * S_{bit} * K - 83804 \quad (7)$$

**Tabel 5.**  
**Nilai Signifikansi Variabel  $S_{CTAM}$  Persamaan 7**

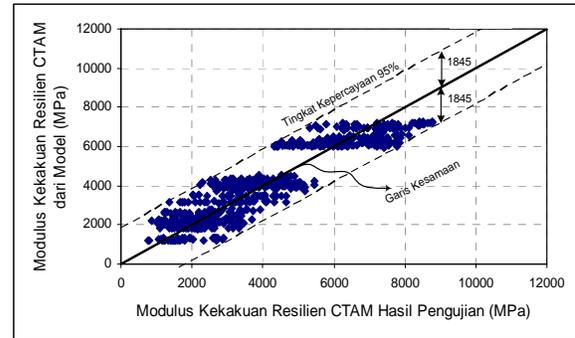
Variabel	Nilai signifikansi
$S_{CTAM}$	0,000
K	0,009
KA	0,000
$VIM_{CTAM}$	0,000
$VFM_{CTAM}$	0,000
$T * K$	0,000
$S_{bit} * K$	0,000
Konstan	0,000

Menurut Santoso (2002) suatu model dikatakan baik secara statistik apabila :

1. Pada tingkat kepercayaan 95%, variabel terikat dan variabel bebas dari model tersebut harus memiliki nilai signifikansi lebih kecil dari 0,05.
2. Regresi yang dihasilkan model tersebut harus normal.
3. Tidak terdapat problem multikolonieritas (*multico problem*) antar variabelnya.

Model konstitutif  $S_{CTAM}$  pada Persamaan 7 telah memenuhi butir pertama dari persyaratan di atas. Sedangkan untuk mengetahui apakah model tersebut juga memenuhi persyaratan butir kedua dan ketiga, perlu dilakukan uji normalitas dan uji multikolonieritas.

Uji kenormalan suatu model dilakukan dengan memplotkan variabel terikat (*dependent variables*) yang didapat dari perhitungan dengan menggunakan model tersebut terhadap hasil yang didapat dari pengujian. Model regresi yang baik adalah model yang menghasilkan distribusi data normal atau mendekati normal, yaitu distribusi data yang tersebar disekitar garis kesamaan (*equal line*) dan memiliki kecenderungan yang sama dengan garis tersebut. Gambar 1 merupakan hasil uji kenormalan Persamaan 7.



**Gambar 1.** Sebaran Data yang Didapat dari Model  $S_{CTAM}$  fungsi (K, KA,  $VIM_{CTAM}$ ,  $VFM_{CTAM}$ ) Dengan T dan  $S_{bit}$  Sebagai Faktor Interkorelasi antar Variabel Terhadap  $S_{CTAM}$  Hasil Uji

Dari gambar ini dapat dilihat bahwa distribusi data yang didapat dari Persamaan 7 terhadap hasil uji sebenarnya tersebar disekitar garis kesamaan dan memiliki kecenderungan yang sama dengan garis kesamaan tersebut, sehingga Persamaan 7 merupakan model regresi linier yang bersifat normal.

Uji multikolonieritas dilakukan dengan menghitung besaran VIF (*Variance Inflation Factor*) setiap variabel dalam suatu model konstitutif atau persamaan matematis. Nilai VIF Persamaan 7 yang dihitung dengan menggunakan diagnosis kolinieritas dari program SPSS diberikan pada Tabel 6.

Suatu model konstitutif atau persamaan matematis dapat dikatakan baik bila variabel-variabel bebasnya memiliki nilai VIF lebih kecil dari 3. Untuk Persamaan 7, seperti yang ditunjukkan pada Tabel 6, nilai VIF variabel-variabel dalam persamaan ini tidak berkisar pada angka 3, oleh karena itu persamaan ini dapat dipastikan mengandung masalah multikolonieritas.

**Tabel 6.**  
**Nilai VIF Variabel-variabel Dalam Persamaan 7**

Variabel	VIF
K	1,563
KA	21,655
$VIM_{CTAM}$	298,702
$VFM_{CTAM}$	341,993
$T * K$	5,862
$S_{bit} * K$	6,072

Dari uraian di atas dapat disimpulkan bahwa walaupun model konstitutif  $S_{CTAM}$  pada Persamaan 7 pada tingkat kepercayaan 95% memiliki nilai  $R^2$  ( $R^2 = 0,819$ ) yang cukup tinggi dan regresinya bersifat normal tetapi karena pada

persamaan ini mengandung masalah multi kolonieritas maka Persamaan 7 dipandang kurang memadai untuk digunakan dalam memprediksi nilai  $S_{CTAM}$ .

Untuk mengeliminasi masalah multikolonieritas pada Persamaan 7 maka variabel yang memiliki VIF paling besar dikeluarkan dari persamaan ini. Dengan mengeluarkan variabel  $VFM_{CTAM}$  dari Persamaan 7 akan didapatkan Persamaan 8 dengan nilai  $R^2 = 0,802$ .

$$S_{CTA} = 2802,366 * KA - 4,057 * K + 202,652 * VIM_{CTAM} - 0,362 * T * K + 3,110 * S_{bit} * K - 4437 \quad (8)$$

Persamaan inipun ternyata masih memiliki masalah multiko, yaitu pada variabel  $T * K$  dan  $S_{bit} * K$ . Karena analisis statistik yang dilakukan dengan menggunakan faktor temperatur dan modulus kekakuan bitumen sebagai faktor interkoneksi antar variabel yang sangat mempengaruhi  $S_{CTAM}$ , yaitu seperti yang ditunjukkan pada Persamaan 3, tidak memberikan hasil yang akurat, maka analisis selanjutnya dilakukan hanya dengan menggunakan variabel dalam Persamaan 2 saja dan tanpa menggunakan variabel interaksi.

Dari analisis statistik dengan menggunakan variabel pada Persamaan 1 di dapat persamaan Persamaan 9 dan Persamaan 10 yang masing-masing memiliki nilai  $R^2 = 0,663$  dan  $R^2 = 0,698$ . Pada tingkat kepercayaan 95%, variabel terikat dan variabel bebas dari dalam persamaan ini memiliki nilai signifikansi lebih kecil dari 0,05 dan nilai VIF lebih kecil dari 3, seperti yang ditunjukkan pada Tabel IV.10 dan Tabel IV.11. Distribusi  $S_{CTAM}$  yang diprediksi dengan Persamaan 9 dan Persamaan 10 terhadap hasil uji adalah normal, masing-masing ditunjukkan pada Gambar 2 dan Gambar 3. Dengan demikian dapat disimpulkan bahwa Persamaan 9 dan Persamaan 10 adalah suatu model yang dapat dipergunakan untuk memprediksi  $S_{CTAM}$  dengan hasil yang cukup akurat dengan standar deviasi perkiraan nilai masing-masing sebesar 1648 MPa dan 1693 MPa. Karena Persamaan 10 memberikan *standard error of the estimate* yang lebih besar (1177,3 MPa) dari Persamaan 9 (1112,5 MPa), maka Persamaan 9 dianggap lebih baik dari Persamaan 10.

Tabel 10.  
Nilai VIF Variabel-variabel dalam Persamaan 9

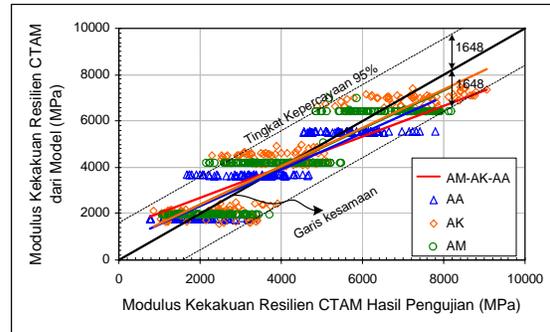
Variabel	VIF
TKA	1,021
$VFM_{CTAM} * K$	1,021

Tabel 11.  
Nilai VIF Variabel-variabel dalam Persamaan 10

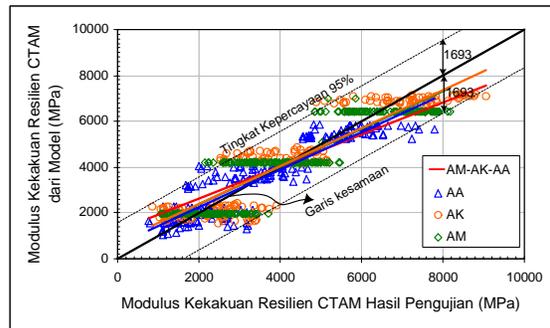
Variabel	VIF
TKA	2,819
K	1,024
$T * VIM_{CTAM}$	2,860

$$S_{CTAM} = 7822,653 - 42,326 * T * KA + 0,09 * VFM_{CTAM} * K \quad (9)$$

$$S_{CTAM} = 8005,531 - 27,822 * T * KA + 6,488 * K - 7,616 * T * VIM_{CTAM} \quad (10)$$



Gambar 2. Sebaran  $S_{CTAM}$  Hasil Prediksi Model Mekanistik Fungsi (T, KA,  $VFM_{CTAM}$  dan K) Terhadap  $S_{CTAM}$  Hasil Uji (Persamaan 9)



Gambar 3. Sebaran  $S_{CTAM}$  Hasil Prediksi Model Mekanistik Fungsi (T, KA,  $VIM_{CTAM}$  dan K) Terhadap  $S_{CTAM}$  Hasil Uji (Persamaan 10)

Analisis statistik selanjutnya dilakukan dengan menggunakan variabel dari Persamaan 10 tetapi dengan memisahkan jenis aspal yang digunakan menghasilkan tiga model lainnya yang secara statistik memenuhi kriteria sebuah model seperti yang disyaratkan oleh Santoso (2002) sehingga cukup layak digunakan untuk memprediksi  $S_{CTAM}$  berdasarkan jenis aspal yang digunakan. Ketiga model tersebut adalah :

$$S_{CTAM_{AM}} = 16,008 * K - 21,701 * T * VIM_{CTAM} + 5240,482 \quad (R^2=0,765) \quad (11)$$

$$S_{CTAM_{AK}} = 6,357 * K - 15,82 * T * VIM_{CTAM} + 7486,223 \quad (R^2=0,536) \quad (12)$$

$$S_{CTAM_{AA}} = 1,856 * K - 17,943 * T * VIM_{CTAM} + 8060,981 \quad (R^2=0,770) \quad (13)$$

Distribusi hasil prediksi  $S_{CTAM}$  yang didapat dari masing-masing model dari Persamaan 11, 12 dan Persamaan 13 terhadap  $S_{CTAM}$  hasil uji dan kedekatannya dengan  $S_{CTAM}$  yang didapat dari Persamaan 10 seperti ditunjukkan pada Gambar 3.

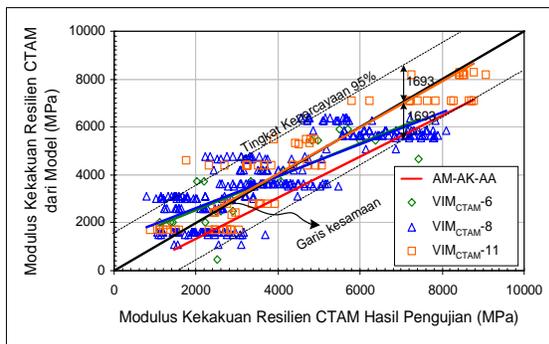
Model lainnya di bawah ini (Persamaan 14, 15 dan Persamaan 16) dibuat dengan menggunakan variabel dalam Persamaan 10 dan berdasarkan pengelompokan rongga udara dalam CTAM ( $VIM_{CTAM}$ ), dan kuat tekan mortar (K) yang digunakan (Persamaan 17, 18 dan Persamaan 19). Distribusi hasil prediksi  $S_{CTAM}$  yang didapat dari masing-masing model terhadap  $S_{CTAM}$  hasil uji dan kedekatannya dengan  $S_{CTAM}$  yang didapat dari Persamaan 10 ditunjukkan pada Gambar 4 dan Gambar 5.

Dari Gambar 3, 4 dan Gambar 5 dapat disimpulkan bahwa  $S_{CTAM}$  yang diprediksi dengan menggunakan Persamaan 10 adalah kurang sensitif terhadap jenis aspal dan kuat tekan mortar yang digunakan tetapi sensitif terhadap rongga udara yang terkandung dalam CTAM. Oleh sebab itu model-model di atas hanya berlaku untuk nilai  $S_{bit}$  dan kuat tekan mortar seperti yang digunakan dalam studi ini, yaitu  $S_{bit}$  dalam rentang 0,02 MPa – 2,0 MPa dan kuat tekan mortar umur 28 hari antara 290 kg/cm<sup>2</sup>– 340 kg/cm<sup>2</sup>.

$$S_{CTAM_{VM-6}} = 5217,652 - 42,11 * T * KA + 12,401 * K \quad (R^2 = 0,666) \quad (14)$$

$$S_{CTAM_{VM-8}} = 5617,955 - 40,038 * T * KA + 11,822 * K \quad (R^2 = 0,658) \quad (15)$$

$$S_{CTAM_{VM-11}} = 13578,794 - 72,037 * T * KA + 1,595 * K \quad (R^2 = 0,952) \quad (16)$$

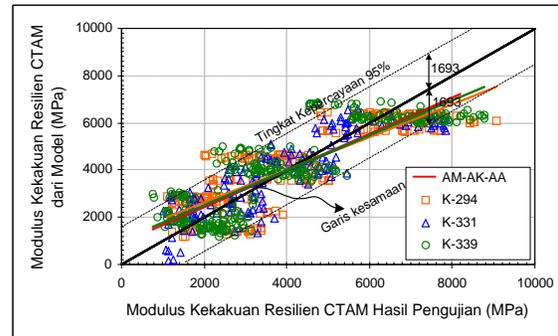


**Gambar 4.** Sebaran  $S_{CTAM}$  hasil prediksi model mekanistik linier sebagai fungsi (T, KA dan K) berdasarkan pengelompokan  $VIM_{CTAM}$  terhadap  $S_{CTAM}$  hasil uji dan Persamaan 10

$$S_{CTAM_{K-294}} = 9940,354 - 35,399 * T * KA - 3,989 * T * VIM_{CTAM} \quad (R^2 = 0,692) \quad (17)$$

$$S_{CTAM_{K-331}} = 9552,635 - 1,807 * T * KA - 18,595 * T * VIM_{CTAM} \quad (R^2 = 0,754) \quad (18)$$

$$S_{CTAM_{K-339}} = 10671,825 - 31,232 * T * KA - 7,057 * T * VIM_{CTAM} \quad (R^2 = 0,736) \quad (19)$$



**Gambar 5.** Sebaran  $S_{CTAM}$  hasil prediksi model mekanistik linier sebagai fungsi (T, KA, dan  $VIM_{CTAM}$ ) berdasarkan pengelompokan kuat tekan mortar (K) terhadap  $S_{CTAM}$  hasil uji dan Persamaan 10

#### IV. KESIMPULAN

Dari penelitian ini didapat tiga model konstitutif  $S_{CTAM}$ , yang dianggap cukup layak untuk memprediksi  $S_{CTAM}$ , yaitu :

$$S_{CTAM} = 8005,531 - 27,822 * T * KA + 6,488 * K - 7,616 * T * VIM_{CTAM}$$

Pada tingkat kepercayaan 95%, variabel terikat dan variabel bebas dari dalam persamaan ini memiliki nilai signifikansi lebih kecil dari 0,05 dan nilai VIF lebih kecil dari 3 hasil predikasinya terdistribusi dengan normal dengan standar deviasi perkiraan sebesar 1693 MPa dan *standard error of the estimate* sebesar 1112,5 MPa.

Model-model yang didapat dari penelitian ini hanya berlaku untuk nilai  $S_{bit}$  dan kuat tekan mortar seperti yang digunakan dalam studi ini, yaitu  $S_{bit}$

dalam rentang 0,02 MPa – 2,0 MPa dan kuat tekan mortar umur 28 hari antara 290 kg/cm<sup>2</sup>– 340 kg/cm<sup>2</sup>.

## DAFTAR PUSTAKA

Bonnaure, F., G. Gest, A. Gravois and P. Uge, (1977), A New Method of

Predicting the Stiffness of Asphalt Paving Mixtures, Proceeding Association of Asphalt Paving Technologies, Vol. 46. pp.64-100.

Brown, S.F., Janet, M., Bruton, (1982), An Introduction to The Analytical Design of Bituminous Pavement, 2<sup>nd</sup> Edition, University of Nottingham, U. K.

Huang Yang, H., (1993), Pavement Analysis and Design, Prentice Hall, Inc. New Jersey.

Jamal A. Almudaiheem and Faisal, H. Al-Sugair, (1991), Effect of Loading Magnitude on Measured Resilient Modulus of Asphaltic Concrete Mixes, TRR. No. 1317, Asphalt Mixtures Design, Testing and Evaluation, TRB, National Research Council, Washington, D. C.

Yamin R. Anwar dan Siswosoebrotho B. I., (2002.a), Modifikasi Marshall Dalam Perencanaan Campuran Aspal Porus untuk Cement Treated Asphalt Mixture, *PUSLITBANG JALAN, Jurnal No.19. Vol. 3.*

Yamin R. Anwar dan Siswosoebrotho B. I., (2002.b), Karakteristik Mortar Semen untuk Cement Treated Asphalt Mixture, *Jurnal TEKNIK SIPIL ITB No.3. Vol. 9.*

Yamin R. Anwar dan Siswosoebrotho B. I., Elhasnet dan Herman, (2003), Karakteristik Mortar Semen untuk Cement Treated Asphalt Mixture, Prosiding Simposium VI FSTPT, Univ. Hasanuddin, Makassar.

Yamin R. Anwar, (2004), Faktor-faktor yang Mempengaruhi Modulus Kekakuan Resilien Cement Treated Asphalt Mixture, *PUSLITBANG JALAN, Jurnal No.2. Vol. 21.*

### **Penulis :**

**R. Anwar Yamin**, Peneliti Madya, pada Puslitbang Prasarana Transportasi Badan Litbang Departemen Pekerjaan Umum.

