

EVLUASI GRADASI AGREGAT PADA CAMPURAN AC-WC MENGUNAKAN TEORI FRACTAL

Indira, Alvin Marpaung, Bagus Hario Setiadji ^{*)}, Supriyono ^{*)}

Jurusan Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Diponegoro
Jl. Prof Soedarto, Tembalang, Semarang. 50275, Telp.: (024)7474770, Fax.: (024)7460060

ABSTRAK

Kerusakan jalan di Indonesia umumnya disebabkan oleh pembebanan yang berlebihan akibat pertumbuhan jumlah kendaraan yang tinggi. Selain karena faktor beban, perkerasan itu sendiri merupakan hal utama yang mempengaruhi kerusakan jalan. Agregat berperan penting dalam pembentukan lapis perkerasan karena merupakan komponen utama dari campuran aspal yaitu 80% dari volume, dan 95% dari berat total campuran. Gradasi adalah salah satu sifat agregat yang mempengaruhi kekuatan perkerasan. Teori fractal digunakan untuk menggambarkan secara kuantitatif kompleksitas geometris dan kemampuan mengisi ruang suatu objek tertentu yang diharapkan mampu mengoptimalkan kinerja campuran. Pada penelitian ini, jenis campuran yang digunakan adalah aspal beton (AC-WC). Campuran AC-WC dibuat dengan gradasi yang berbeda, yaitu; gradasi yang memiliki persentase lolos saringan mendekati spesifikasi batas atas, tengah, dan bawah. Setiap gradasi dianalisis nilai fractalnya dan didapatkan nilai fractal 2,5420 untuk gradasi atas, 2,4998 untuk gradasi tengah, dan 2,4113 untuk gradasi bawah. Semakin besar nilai fractal, maka semakin banyak jumlah fraksi agregat halus. Setiap gradasi dibuat benda uji, dan diuji marshall. Dari hasil pengujian, dilakukan kembali perhitungan dengan menggunakan simulasi secara matematis untuk mendapatkan nilai VIM yang sesuai dengan persyaratan, yaitu 3%-5%. Dapat disimpulkan bahwa nilai fractal gradasi atas yang memiliki karakteristik rongga udara memenuhi spesifikasi berkisar antara 2,5419 sampai 2,5422, gradasi tengah berkisar antara 2,4997 sampai 2,4998, dan gradasi bawah berkisar 2,4111 sampai 2,4115.

Kata kunci: Fractal, Gradasi Agregat, VIM

ABSTRACT

Pavement distresses in Indonesia are generally caused by excessive loading due to the high growth number of vehicles. Beside of excessive loading, pavement itself is also the main thing that affects pavement distress. Asphalt Concrete Wearing Course (AC-WC) is the surface layer that contacts traffic load directly. Aggregate has important role on pavement formation because aggregate is the main component of hot mix asphalt that represents 80% by volume and 95% by weight of asphalt concrete mixture. The type of mixture that is used is Asphalt Concrete Wearing Course (AC-WC) mixture. Asphalt Concrete Wearing Course (AC-WC) was made by 3 different gradations which are the gradation that is on top of the specification curve, on between, and on the bottom of the specification curve. This research created specimen with asphalt content of 4,5%, 5%, 5,5%, 6% and 6,5% for each gradation mix. This research analyzed the relation between the Marshall Test results and fractal dimension. This research obtained the optimal value of fractal is between

^{*)} Penulis Penanggung Jawab

2,4113 to 2.5420. A further calculation using air void simulation was done to get mixture gradation that meets the VIM requirement which is 3% to 5%. The results show that *D* values on the top gradation curve that has 3%-5% air void are 2,5419, 2,5420, and 2,5421, on the middle gradation curve are 2,4997, 2,4997, and 2,4998, and on the bottom gradation curve are 2,4111, 2,4113, and 2,4115.

Keywords: *Fractal, Aggregate Gradation, VIM*

PENDAHULUAN

Jalan merupakan infrastruktur dasar dan utama dalam kemajuan perekonomian nasional dan daerah. Menurut Taufik (2014), jalan adalah urat nadi perekonomian, sedangkan hanya 60-70 % dari kurang lebih 400 ribu km jalan kabupaten/kota yang kondisinya baik. Kerusakan jalan di Indonesia umumnya disebabkan oleh pembebanan yang berlebihan sebagai akibat pertumbuhan jumlah kendaraan yang cepat dari kendaraan pribadi maupun komersial. Lapis aus aspal beton (AC-WC) merupakan lapis perkerasan yang menerima langsung beban lalu lintas. Oleh karena itu, diperlukan perencanaan yang tepat agar didapatkan lapis perkerasan yang kuat menahan beban. Agregat berperan penting dalam pembentukan lapis perkerasan karena merupakan komponen utama dari perkerasan yaitu 80% dari volume, dan 95% dari berat total campuran. Gradasi adalah salah satu sifat agregat yang mempengaruhi kekuatan dari perkerasan.

Selama ini cara untuk mendapatkan gradasi agregat menggunakan cara analitis (*trial and error*) dan grafis. Kedua cara tersebut mungkin memang tidak terlihat kekurangannya secara jelas. Tetapi penggunaan cara *trial and error* maupun grafis memberikan selisih hasil yang berbeda sehingga dapat membuat hasil gradasi yang diperoleh tidak optimal.

Teori fractal adalah cara untuk menggambarkan secara kuantitatif kompleksitas geometris dan kemampuan mengisi ruang suatu objek tertentu. Fractal geometri telah menjadi sebuah kata kunci, sejak awal diperkenalkan oleh Mandelbrot pada tahun 1975, dalam memahami konsep dimensi ruang sebuah benda dengan bentuk yang kompleks dan tidak teratur. Perhitungan teori fractal tidak hanya dapat memahami kurva gradasi, tetapi juga dapat merefleksikan karakteristik gradasi, yang dimana dapat menjadi dasar pengoptimalan desain campuran beraspal. Hal ini yang mendasari penelitian tentang gradasi agregat terhadap campuran beraspal berdasarkan teori fractal.

Tinjauan Pustaka

Campuran Aspal Beton

Campuran aspal beton (laston) adalah campuran beraspal bergradasi menerus yang umum digunakan untuk jalan-jalan dengan beban lalu lintas berat. Berdasarkan fungsinya, laston dibagi menjadi : AC Lapis Aus (AC-WC), AC Lapis Antara (AC-BC), dan AC Lapis Pondasi (AC-Base). Lapis Aus (AC-WC) adalah lapis perkerasan yang langsung terkena beban.

Stabilitas campuran didapat dari hasil saling mengunci (*interlocking*) agregat yang dipakai. Aspal berfungsi sebagai bahan pengikat dan pengisi. Semakin banyak aspal yang dipakai maka semakin awet (*durable*) campuran tersebut, namun di lain sisi kadar rongga udara dalam campuran padat (*air void*) berkurang. Bila *air void* melebihi batas minimum, karena ada tambahan pemadatan oleh lalu lintas, maka *air void* menjadi nol dan dapat

menyebabkan *bleeding*. Campuran aspal beton yang dihasilkan harus memenuhi persyaratan pada Tabel 1.

Tabel 1. Ketentuan Sifat-Sifat Campuran Lapis Aspal Beton (LASTON)

| Sifat-sifat Campuran | Persyaratan | |
|-------------------------------|-------------|--------|
| Rongga dalam Campuran/VIM (%) | Min. | 3,5 |
| Rongga dalam Agregat/VMA (%) | Maks. | 5 |
| Rongga Terisi Aspal/VFA (%) | Min. | 15 |
| Stabilitas Marshall (kg) | Min. | 800 |
| Pelelehan (mm) | Min. | 3 |
| Marshall Quotient (kg/mm) | Min. | 250 |
| Jumlah Tumbukan per Bidang | | 2 x 75 |

Sumber : Bina Marga (2010)

Gradasi Agregat

Gradasi adalah susunan butir agregat sesuai ukurannya, merupakan hal penting dalam menentukan stabilitas perkerasan, berpengaruh terhadap besarnya volume rongga (*void*), *workability* dan stabilitas dalam campuran. Gradasi agregat secara umum dapat dikelompokkan, sebagai berikut :

1. Gradasi Menerus

Agregat bergradasi menerus adalah agregat yang ukuran butirnya terdistribusi merata dalam satu rentang ukuran butir. Agregat bergradasi menerus disebut pula agregat bergradasi rapat. Campuran agregat bergradasi menerus mempunyai pori sedikit, mudah dipadatkan, dan mempunyai stabilitas tinggi. Tingkat stabilitas ditentukan dari ukuran butir agregat terbesar yang ada.

2. Gradasi Seragam

Gradasi seragam adalah agregat yang hanya terdiri dari butir-butir agregat berukuran sama atau hampir sama. Campuran beton aspal yang dibuat dari agregat bergradasi seragam akan memiliki kelenturan yang baik, tetapi stabilitasnya kecil.

3. Gradasi Senjang

Merupakan campuran agregat yang tidak memenuhi 2 kategori diatas. Agregat bergradasi buruk yang umum digunakan untuk lapisan perkerasan lentur yaitu gradasi celah (*gap graded*), merupakan campuran agregat dengan 1 fraksi hilang atau 1 fraksi sedikit sekali. Sering disebut juga gradasi senjang. Agregat dengan gradasi senjang akan menghasilkan lapisan perkerasan yang mutunya terletak antara kedua jenis diatas.

Teori Fractal

Fractal merupakan sebuah kelas bentuk geometri kompleks yang umumnya mempunyai “dimensi pecahan”, yaitu sebuah konsep yang pertama kali diperkenalkan oleh matematikawan Felix Hausdorff pada tahun 1918. Menurut Mandelbrot (1982), pada umumnya bentuk-bentuk fractal bersifat menyerupai diri sendiri (*self-similar*) artinya setiap bagian kecil dalam sebuah fractal dapat dipandang sebagai replikasi skala kecil dari bentuk keseluruhan. *Fractal geometry* digunakan untuk menggambarkan morfologi dari suatu bentuk tidak teratur dengan cara mengkarakterisasi struktur tersebut dalam satu, dua, dan tiga ruang dimensi dengan menggunakan dimensi fractal D1, D2, dan D3. (Tang et al.,

2001). Dimensi fractal ditetapkan dengan menggunakan hubungan skala pangkat geometris antara setiap dimensi geometrik (massa atau volume untuk tiga-dimensi ruang, luasan untuk dua-dimensi ruang, dan perimeter atau garis untuk satu-dimensi ruang), dengan karakteristik skala panjang suatu agregat.

Tiga dimensi fractal D_3 yang menggambarkan volume V dari partikel, digambarkan dengan perbandingan :

$$V \propto R^{D_3} \quad (1)$$

Untuk suatu gradasi agregat, apabila distribusi masa agregat dikaji dengan dimensi fractal, maka akan didapatkan persamaan sebagai berikut :

$$P(r) = \frac{r^{3-D} - r_{\min}^{3-D}}{r_{\max}^{3-D} - r_{\min}^{3-D}} \quad (2)$$

Dimana :

$P(r)$ = *passing rate* dari agregat

r_{\max}, r_{\min} = ukuran maksimum dan ukuran minimum partikel agregat

Kurva gradasi yang berbeda dapat diperoleh sesuai dengan nilai D yang telah diberikan, dan variasi nilai D akan menentukan jenis kurva gradasi. r_{\min} dapat diabaikan karena kecilnya nilai tersebut, maka akan didapatkan persamaan (2) menjadi :

$$P(r) = \frac{r}{r_{\max}}^{3-D} \quad (3)$$

Kemudian apabila M adalah masa total dari gradasi agregat, dan ρ adalah *density* agregat, maka volume adalah :

$$V = \frac{M}{\rho} \quad (4)$$

Dari persamaan (3), dan (4) maka akan didapatkan persamaan (5) :

$$P(r) = \frac{Mr}{M} = \frac{Vr}{V} = \frac{r}{r_{\max}}^{3-D} \quad (5)$$

Dimana:

Mr = Total fractal agregat dengan ukuran partikel kurang dari partikel r

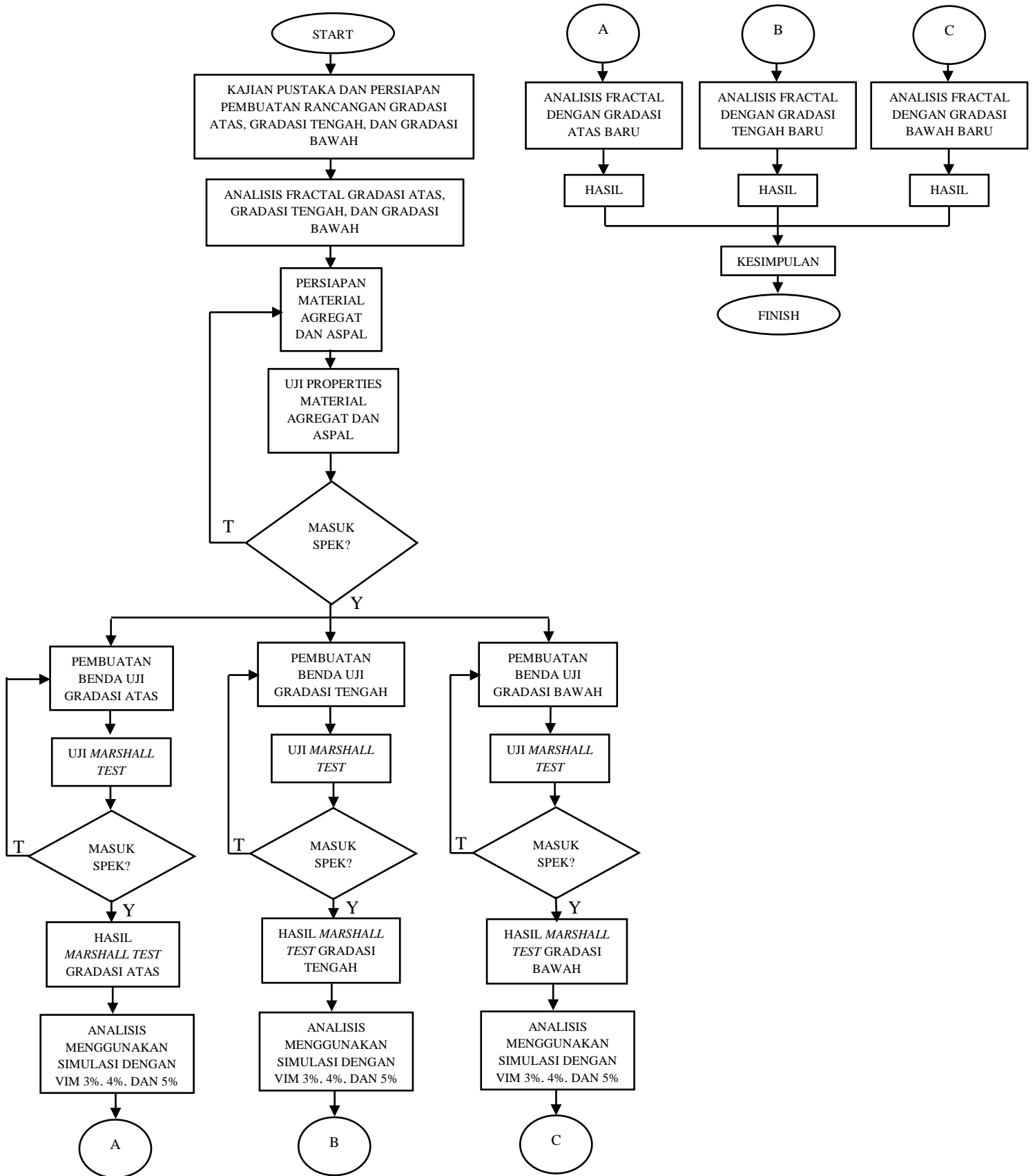
Saat ini, metode utama yang digunakan untuk menghitung dimensi fractal dari gradasi agregat adalah dengan menghitung kemiringan (*slope*) menurut koordinat logaritmik ganda $\ln(Mr/M)$ dan $\ln r$ menggunakan persamaan regresi linear. Pada tahap ini dimensi fractal didapatkan dari kemiringan *slope* tersebut sebagai berikut :

$$\ln \frac{Mr}{M} = 3 - D \ln r + a \quad (6)$$

Apabila dianalogikan persamaan (6) sebagai $y = bx + a$, maka dari persamaan (6) D dapat dicari dengan persamaan :

$$D = 3 - b \quad (7)$$

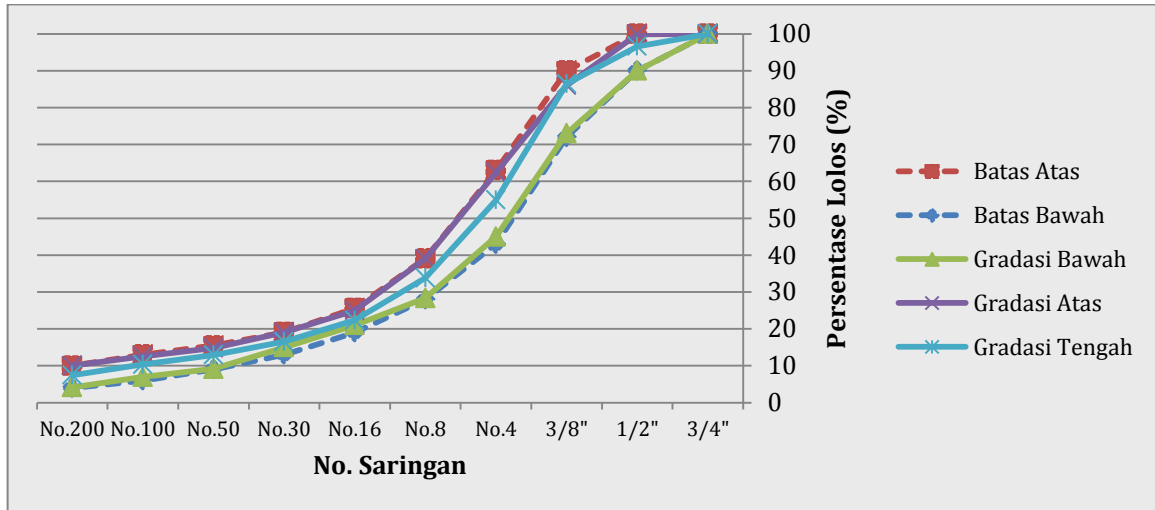
METODOLOGI PENELITIAN



Gambar 1. Diagram Alir Metodologi Penelitian

ANALISIS NILAI FRACTAL

Persentase lolos saringan pada gradasi atas, tengah dan bawah dapat dilihat pada Gambar 2.



Gambar 2. Analisis Saringan Gradasi Atas, Tengah, dan Bawah

Hasil nilai fractal pada gradasi atas, tengah, dan bawah dapat dilihat pada Tabel 2.

Tabel 2. Hasil Perhitungan Nilai Fractal

| Gradasi | Koefisien Determinasi (R) | a | Nilai Fractal (D) |
|---------|---------------------------|--------|-------------------|
| Atas | 0,9813 | 0,458 | 2,5420 |
| Tengah | 0,9863 | 0,5002 | 2,4998 |
| Bawah | 0,9974 | 0,5887 | 2,4113 |

Gradasi atas memiliki persentase agregat kasar sebesar 60,9%, agregat halus 29,1%, dan *filler* 10%. Gradasi tengah memiliki persentase agregat kasar sebesar 66,45%, agregat halus 26,55%, dan *filler* 7%. Gradasi bawah memiliki persentase agregat kasar sebesar 72%, agregat halus 24%, dan *filler* 4%. Pada tahap ini dapat disimpulkan bahwa semakin kurva gradasi campuran mendekati batas atas, maka nilai fractal akan semakin besar. Atau dengan kata lain, semakin banyak jumlah agregat halus dalam suatu campuran, maka nilai fractal akan semakin besar, begitu juga sebaliknya.

HASIL PENELITIAN

Sebelum benda uji dibuat, agregat dan aspal diuji terlebih dahulu, yang hasilnya dapat dilihat pada Tabel 3 dan 4.

Tabel 3. Hasil Uji Properties Agregat

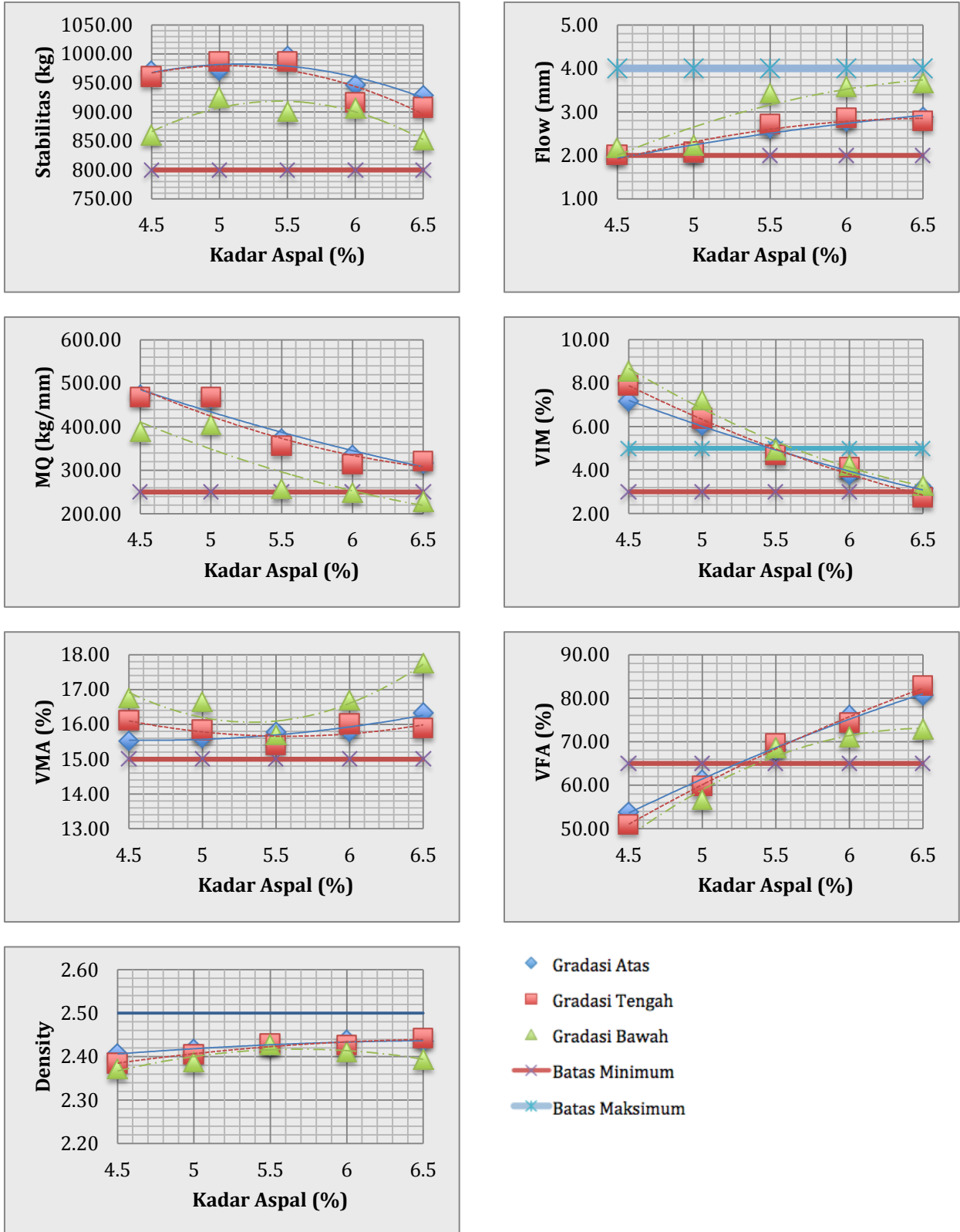
| No | Jenis Pemeriksaan | Hasil | Satuan | Pedoman | Spesifikasi | |
|----|----------------------------------|-------|--------------------|--------------------|-------------|-----|
| | | | | | Min | Max |
| 1 | Berat Jenis | | | SK SNI M-09-1989-F | | |
| | Batu Pecah Maks. 3/4" | 2.73 | gr/cm ³ | | 2.5 | - |
| | Batu Pecah Maks. 1/2" | 2.75 | gr/cm ³ | | 2.5 | - |
| | Abu Batu | 2.679 | gr/cm ³ | | 2.5 | - |
| 2 | Penyerapan | | | ASTM C131 | | |
| | Batu Pecah Maks. 3/4" | 1.341 | % | | - | 3 |
| | Batu Pecah Maks. 1/2" | 1.489 | % | | - | 3 |
| | Abu Batu | 2.229 | % | | - | 3 |
| 3 | Abrasi | 24 | % | ASTM D1664 - 80 | - | 40 |
| 4 | Kelekatan Agregat terhadap Aspal | 99 | % | SNI 03-4428-1997 | 95 | - |
| 5 | <i>Sand Equivalent</i> | 93.10 | % | | 50 | - |

Tabel 4. Hasil Uji Properties Aspal

| No | Jenis Pemeriksaan | Hasil | Satuan | Pedoman | Spesifikasi | |
|----|--|-----------|--------------------|-------------------------|-------------|-----|
| | | | | | Min | Max |
| 1 | Berat Jenis Aspal pada 25°C | 1.043 | gr/cm ³ | SK SNI M-30-1990-F | 1 | - |
| 2 | Penetrasi Aspal | 68 | 0,1 mm (dmm) | ASTM D946 / D946M - 09a | 60 | 70 |
| 3 | Titik Lembek Aspal | 52 | °C | ASTM D36 / D36M - 09 | 48 | 58 |
| 4 | Kehilangan Berat Minyak dan Aspal | 0.345% | % | SK SNI M-29-1990-F | - | 0.8 |
| 5 | Penetrasi setelah kehilangan berat | 67.9 | 0,1 mm (dmm) | SK SNI M-29-1990-F | 54 | - |
| 6 | Titik Nyala | 234°C | °C | SK SNI M-19-1990-F | 200 | - |
| | Titik Bakar | >300°C | | | | |
| 7 | Daktilitas | 106.85 cm | cm | SK SNI M-18-1990-F | 100 | - |
| 8 | Kelarutan Aspal dalam CCl ₄ | 99.05% | % | SNI 06-2438-1991 | 99 | - |

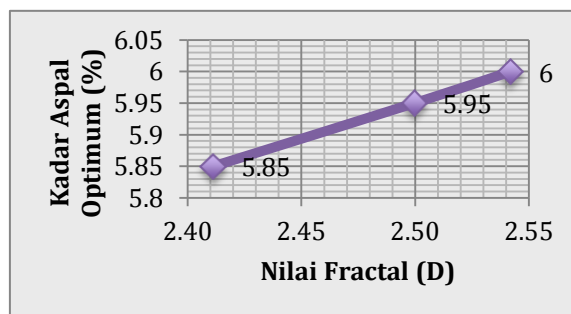
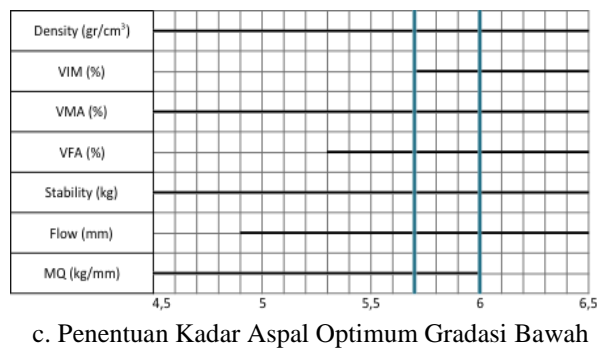
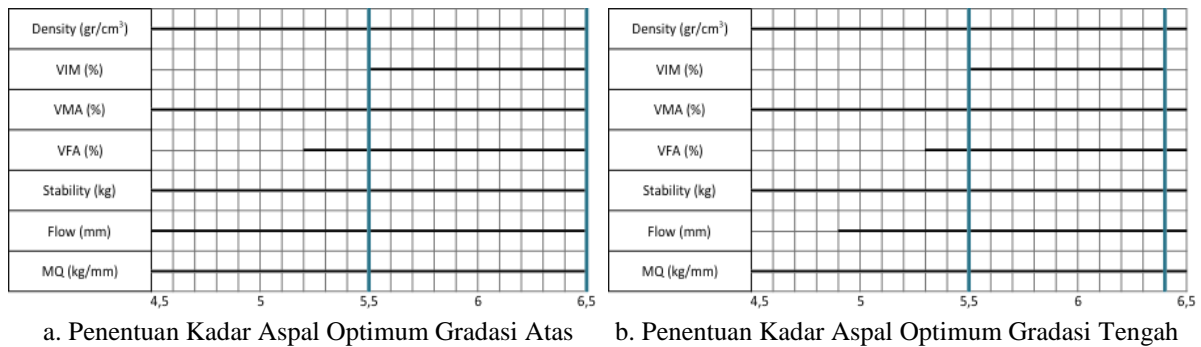
Hasil Uji Marshall

Hasil uji Marshall dari campuran gradasi atas, tengah, dan bawah dapat dilihat pada Gambar 2.



Gambar 3. Hasil Uji Marshall Gradasi Atas, Tengah, dan Bawah

Dari hasil uji Marshall, maka didapatkan kadar aspal optimum untuk gradasi atas sebesar 6%, gradasi tengah 5,95%, dan gradasi bawah 5,85%, sehingga hubungan antara kadar aspal optimum dengan nilai fractal dapat dilihat pada Gambar 3.



Gambar 4. Kadar Aspal Optimum Gradasi Atas, Tengah, dan Bawah

Dari hasil uji marshall didapat bahwa gradasi bawah dengan nilai fractal terendah memiliki nilai MQ terendah dibandingkan gradasi atas dan tengah. Hal ini disebabkan karena gradasi bawah memiliki jumlah fraksi agregat kasar lebih banyak, sehingga *flow* lebih besar dibandingkan gradasi tengah dan bawah. Untuk rongga udara, gradasi bawah memiliki jumlah rongga udara lebih besar dibandingkan dengan gradasi atas dan tengah. Nilai VMA terkecil dimiliki gradasi atas, karena semakin banyak fraksi halus dalam campuran maka nilai VMA akan semakin kecil, sedangkan nilai VFA akan semakin besar. Dari ketiga gradasi, nilai kerapatan tertinggi ada pada gradasi atas karena mengandung jumlah fraksi halus lebih banyak dibandingkan fraksi kasar.

Kadar Aspal Optimum

Terlihat bahwa semakin besar nilai fractal maka kadar aspal optimum juga semakin besar. Hal ini disebabkan karena campuran dengan gradasi atas memiliki jumlah fraksi agregat halus lebih banyak. Semakin banyak jumlah agregat halus maka akan semakin banyak juga jumlah luas permukaan agregat yang harus diselimuti aspal. Sehingga kadar aspal optimum untuk campuran semakin tinggi.

Analisis Nilai Fractal dan Rongga Udara

Dari hasil penelitian, dapat dilihat bahwa hubungan antara nilai fractal dengan rongga udara belum optimal. Oleh karena itu, dilakukan simulasi rongga udara yang sebelumnya sudah pernah dilakukan (Mulia, 2002). Dengan menggunakan *trial and error*, maka didapatkan variasi kadar aspal dan rongga udara pada tiap campuran serta gradasi baru yang selanjutnya dianalisis dengan teori fractal dan dapat dilihat pada Tabel 5.

Tabel 5. Hasil Analisis Nilai Fractal

| | Rongga Udara | a | D | R ² |
|----------------|--------------|--------|--------|----------------|
| Gradasi Atas | 3% | 0,4581 | 2,5419 | 0,98217 |
| | 4% | 0,4580 | 2,5420 | 0,98217 |
| | 5% | 0,4579 | 2,5421 | 0,98128 |
| Gradasi Tengah | 3% | 0,5003 | 2,4997 | 0,98636 |
| | 4% | 0,5003 | 2,4997 | 0,98633 |
| | 5% | 0,5002 | 2,4998 | 0,98634 |
| Gradasi Bawah | 3% | 0,5889 | 2,4111 | 0,99738 |
| | 4% | 0,5887 | 2,4113 | 0,99739 |
| | 5% | 0,5885 | 2,4115 | 0,99741 |

Dari Tabel 5 dapat dilihat bahwa gradasi yang menghasilkan nilai rongga udara sesuai spesifikasi memiliki nilai fractal yang berbeda. Dari hasil simulasi dapat disimpulkan bahwa nilai fractal setiap gradasi pada penelitian berada diantara nilai fractal yang didapat dari simulasi.

KESIMPULAN

1. Semakin kecil nilai fractal maka jumlah fraksi agregat kasar akan lebih banyak dibandingkan jumlah fraksi agregat halus yang menyebabkan jumlah kadar aspal optimum berkurang dan berpengaruh pada karakteristik campuran. Semakin besar nilai fractal, nilai *flow* semakin kecil dan stabilitas semakin tinggi, sehingga didapatkan nilai Marshall yang besar. Nilai VIM dan VMA akan semakin kecil, sedangkan nilai VFA dan *density* akan semakin besar.
2. Dari hasil simulasi penelitian besar rongga udara (VIM) diperoleh nilai fractal gradasi atas yang memiliki karakteristik rongga udara memenuhi spesifikasi berkisar antara 2,5419 sampai 2,5422, gradasi tengah berkisar antara 2,4997 sampai 2,4998, dan gradasi bawah berkisar 2,4111 sampai 2,4115. Dari hasil simulasi, dapat dilihat bahwa nilai fractal setiap gradasi pada penelitian berada diantara hasil nilai fractal pada simulasi.
3. Direkomendasikan untuk memilih gradasi atas atau tengah karena berdasarkan kadar aspal yang dibutuhkan untuk memberikan hasil VIM yang sesuai dengan spesifikasi, gradasi atas dan tengah membutuhkan kadar aspal yang lebih sedikit dibandingkan gradasi bawah.

DAFTAR PUSTAKA

- Iqbal, M. 2014., Kondisi Jalan di Indonesia yang Baik Hanya 60-70 Persen. <http://www.republika.co.id>. Diakses pada tanggal 22 April 2016.
- Jia, X., dan Ye, F. 2010. *Evaluation of Gradation RAP Based on Fractal Theory*. Tongji University : China.
- Kementrian Pekerjaan Umum. 2014. *Spesifikasi Umum 2010 Revisi 3*. Dirjen Bina Marga: Jakarta.
- Mandelbrot, B.B. 1977. *Fractals – Form, Chance and Dimension*. San Francisco (CA): W.H. Freeman and Company.
- Mandelbrot, B.B. 1982. *The Fractal Geometry of Nature*. San Francisco: W.H. Freeman.
- Mulia, A. 2002. *Penelitian Besar Rongga Udara dalam Campuran menggunakan Simulasi Rongga dan Pengaruhnya terhadap Karakteristik Campuran*. Universitas Indonesia: Jakarta.
- Sukirman, S. 1999. *Perkerasan Lentur Jalan Raya*. Nova: Bandung.
- Tang, S., Ma, Y., and Shiu, C. 2001. *Modelling the Mechanical Strength's of Fractal Aggregates, Colloids, and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, Vol. 180, Elsevier, pp. 7-16.
- Weizhi, D., Xuedong, G., dan Liang, G. 2012. *Study on the Fractal Gradation Optimization of ATB-25*. Ji Lin University: China.