

Evaluasi Kinerja Modulus Resilien dan *Fatigue* Menggunakan “EAF Slag Aggregate” pada Campuran Beraspal Hangat Laston Lapis Antara (WMA AC-BC)

Astri Natalia Situmorang

Program Studi Magister Sistem dan Teknik Jalan Raya, Institut Teknologi Bandung
Jl. Ganesha No. 10 Bandung, 40132
E-mail: astrinatalias@gmail.com

Bambang Sugeng Subagio

Program Studi Magister Sistem dan Teknik Jalan Raya, Institut Teknologi Bandung
Jl. Ganesha No. 10 Bandung, 40132
E-mail: bssubagio@yahoo.com

Kardina Nawassa Setyo Ayuningtyas

Program Studi Magister Sistem dan Teknik Jalan Raya, Institut Teknologi Bandung
Jl. Ganesha No. 10 Bandung, 40132
E-mail: kardina_nawassa@yahoo.com

Abstrak

Pengembangan infrastruktur berkelanjutan dapat didukung dengan memperhatikan keseimbangan antara pemenuhan kebutuhan pada masa sekarang dan masa yang akan datang. Dua aspeknya meliputi aspek lingkungan dan sumber daya. EAF Slag Aggregate merupakan limbah alternatif pengganti agregat yang mendukung aspek sumber daya. Sedangkan Zeolit Aspha-Min adalah aditif Warm Mix yang mendukung mengurangi emisi gas CO₂ dan gas rumah kaca dalam aspek lingkungan. Penelitian ini melihat kinerja campuran beraspal hangat AC-BC dengan penggantian 30% EAF Slag Aggregate terhadap agregat alam. Sedangkan kadar zeolit Aspha-Min berdasarkan penelitian terdahulu dicampurkan pada kadar 0,3% dan 0,5% terhadap berat campuran. Suhu pencampuran dan suhu pemadatan Warm-Mix didapatkan dengan trial and error 10⁰C – 20⁰C dibawah suhu viskositas aspal. Campuran beraspal AC-BC kadar 0,3% Aspha-Min dapat menurunkan suhu pencampuran dan pemadatan sebesar 20⁰C. Campuran ini lebih tahan terhadap fatigue namun memiliki nilai modulus resilien yang paling rendah dari campuran lainnya. Sedangkan campuran beraspal AC-BC kadar 0,5% Aspha-Min dapat menurunkan suhu pencampuran dan pemadatan 10⁰C. Campuran ini cenderung lebih kaku karena memiliki nilai modulus resilien yang paling tinggi dan memiliki nilai siklus Nf yang rendah sehingga rentan terhadap fatigue dibandingkan campuran lainnya. Campuran optimum didapatkan dari proporsi campuran EAF Slag 30% dengan penambahan aditif Aspha-Min 0,3% dalam hal penurunan suhu pemadatan, pencampuran dan ketahanan terhadap fatigue.

Kata-kata Kunci: Campuran beraspal AC-BC, EAF slag aggregate, aspha-min, modulus resilien, dan retak Lelah (fatigue)

Abstract

The development of sustainable infrastructure can supported by fulfilling the demand of the present and the future. The two main aspects are environmental and resource aspects. EAF Slag Aggregate is a steel waste which is used as alternative aggregate that supports the resource aspects, while Zeolit Aspha-Min is a Warm Mix additive that supports the reduction of CO₂ gas emissions and greenhouse gases, which is in the domain of environmental aspects. This study observes the performance of warm asphalt mixture (WMA AC-BC) with the replacement of natural aggregate by 30% EAF Slag Aggregate. Whereas, Aspha-Min zeolite content based on previous studies is mixed at 0.3% and 0.5% of the mixture weight. The mixing and compaction temperature of the Warm-Mix is obtained by trial and error at 10⁰C - 20⁰C below the asphalt viscosity temperature. The mixtures containing Aspha-Min at 0.3% levels is able to reduce mixing and compaction temperatures up to 20⁰C. This mixture is more resistant to fatigue but has the lowest resilient modulus value than the other mixtures, while the mixtures containing Aspha-Min at 0.5% is able to reduce the mixing and compaction temperature up to 10⁰C. This mixture tends to be stiffer because it has the highest resilient modulus value and has a low Nf cycle value that is prone to fatigue compared to other mixtures. The optimum mixture, which is measured in terms of mixing and compacting temperature reduction as well as resistance to fatigue, was obtained at 30% proportion of Slag EAF mixture with the addition of 0.3% Aspha-Min additive.

Keywords: AC-BC asphalt mixture, EAF slag aggregate, aspha-min, resilient modulus, fatigue resistance.

1. Pendahuluan

Di negara – negara berkembang seperti di Eropa dan Amerika, telah lama dikembangkan *warm mix asphalt* (campuran aspal hangat). Disebut hangat karena suhu pemanasannya lebih rendah sekitar $10^0 - 40^0$ C dari campuran konvensional (campuran beraspal panas). Campuran beraspal panas ini diharapkan dapat mengurangi sekitar 10% – 30% penggunaan bahan bakar, mengurangi emisi gas CO₂ dan gas rumah kaca, meningkatkan keselamatan dan kesehatan pekerja akibat penurunan suhu, dan pengerjaan di lapangan (*workability*) dapat dipertahankan walaupun jarak angkutnya jauh.

Untuk mendukung infrastruktur berkelanjutan yang memperhatikan keseimbangan antara pemenuhan kebutuhan pada masa sekarang dan masa yang akan datang, harus diperhatikan aspek lingkungan dan sumber daya. Salah satu sumber daya yang perlu diperhatikan dalam pembangunan konstruksi perkerasan jalan adalah agregat. Perlu adanya alternatif pengganti agregat alam yang semakin hari semakin sedikit akibat pelaksanaan proyek konstruksi kedepannya. Sejumlah perusahaan besi dan baja di Indonesia menghasilkan *slag* mencapai kurang lebih 2 juta ton/tahun. Agregat slag baja beberapa tahun terakhir tidak lagi dikategorikan sebagai limbah B3 (Bahan Berbahaya Beracun) dan sudah memiliki SNI. Banyaknya limbah tersebut diharapkan dapat dimanfaatkan sebagai pengganti agregat pekerjaan konstruksi perkerasan jalan. Berdasarkan penelitian sebelumnya proporsi terbaik campuran terhadap *fatigue* didapatkan dengan proporsi parsial tidak melebihi 50% (Asi, 2007), maka dari itu dalam penelitian ini proporsi campuran EAF *Slag Aggregate* adalah sebesar 30%.

Berdasarkan latar belakang tersebut, diperlukan suatu upaya pengembangan tentang penggunaan campuran beraspal hangat (*Warm Mix*) untuk Laston Lapis Antara (AC-BC) dengan bahan aspal pen 60/70 dan zat aditif Zeolit Aspha-Min dengan memanfaatkan material agregat slag baja. Diharapkan modifikasi aspal dengan menambahkan zat aditif Zeolit Aspha-Min dapat menurunkan suhu pencampuran, dan dapat bersinergi dengan agregat slag baja untuk memperbaiki performa kinerja dari campuran dalam meningkatkan nilai modulus resilien dan ketahanan terhadap retak (*fatigue*). Selain itu, diharapkan penelitian ini dapat menghasilkan nilai karakteristik laboratorium dari campuran beraspal hangat (*Warm Mix*) serta persentase optimum penambahan zat aditif Zeolit Aspha-Min dalam campuran agar diperoleh kinerja campuran yang optimum.

Adapun tujuan dari penelitian ini adalah :

1. Menganalisis karakteristik Stabilitas Marshall dan nilai Stabilitas Marshall rendaman tiap variasi campuran ;
2. Mengevaluasi penurunan suhu pencampuran dan pematatan yang diakibatkan penambahan zat aditif

Zeolit Aspha-Min; dan (3) Menganalisis dan membandingkan nilai Modulus Resilien dan karakteristik kelelahan (*fatigue*) dari campuran AC – BC (HMA) menggunakan aspal Pen 60/70, dengan campuran AC – BC (WMA) menggunakan aspal Pen 60/70+ Zeolit Aspha-Min dengan kadar 0,3% dan 0,5% pada suhu pencampuran dan pematatan tertentu.

Di beberapa negara telah dilakukan penelitian terdahulu mengenai *warm mix* maupun *hot mix* dengan EAF *Slag Aggregate*, salah satunya (Ameri, dkk 2013), dari hasil tes laboratorium dapat disimpulkan bahwa untuk campuran *hot mix*, didapatkan nilai Marshall yang paling tinggi adalah campuran dengan *steel slag* sebagai agregat halus dan agregat kasar. *Warm Mix* dengan agregat alam sebagai agregat halus dan agregat kasar menghasilkan nilai modulus resilien dan nilai ITS yang paling tinggi. *Warm Mix steel slag* sebagai agregat kasar dan agregat alam sebagai agregat halus menghasilkan *properties* adhesif yang lebih baik sehingga menghasilkan campuran beraspal paling kaku dan memiliki ketahanan yang paling baik terhadap deformasi permanen.

Tafti (2016) melakukan evaluasi pengujian laboratorium dengan variasi 3 jenis agregat (*limestone*, EAF *Slag*, dan silika) dan 2 aditif *warm mix* (zeolit Aspha-Min dan Sasobit) dan didapatkan nilai *Marshall Quotient* terbesar diperoleh dari campuran EAF *Slag* agregat dengan tambahan Zeolit Asphamin 2% dan nilai modulus resilien terbesar diperoleh pada campuran *Limestone aggregate* ditambah dengan sasobit 3%.

2. Material dan Tes Laboratorium

2.1 EAS Slag Aggregate

EAF (*Electric Arc Furnace*) merupakan slag hasil pemisahan dan pendinginan dari proses peleburan baja di dalam tungku tanur listrik. EAF *Slag Aggregate* memiliki bentuk yang kasar, porus, bulat, berwarna keabuan dan mengandung sedikit partikel logam besi.

Menurut Seyed (2014), *peak tensile strength* dan *total dissipated energy density* campuran EAF *Slag Aggregate* memiliki nilai yang lebih besar dari pada BOF *Slag Aggregate* sehingga EAF *Slag Aggregate* lebih tahan terhadap aging dibandingkan dengan BOF *Slag* dan lebih sering digunakan pada pekerjaan konstruksi jalan.

Adapun kelebihan dan kekurangan pemakaian EAF *Slag Aggregate* pada konstruksi perkerasan jalan adalah sebagai berikut :

1. Kelebihan :

- *Skid Resistance* (Kekesatan Permukaan) yang tinggi
- Stabilitas tinggi
- Kelekatan yang tinggi terhadap bitumen
- Tahan terhadap *rutting*
- Kekakuan yang tinggi
- Tahan terhadap *fatigue*
- Tahan terhadap deformasi permanen
- Kekuatan kohesif yang tinggi

- Mengalirkan muatan listrik (dapat diaplikasikan pada salju di permukaan perkerasan)

2. Kekurangan :

- Potensi pemuaian volume yang tinggi akibat kelembaban
- Meningkatkan kebutuhan aspal (24-30%) karena struktur porusnya
- Berat jenis yang tinggi dalam volume yang kecil dalam campuran beraspal
- Secara keseluruhan, aplikasinya lebih mahal

Di Indonesia sendiri telah ditetapkan standar tentang ketentuan persyaratan umum dan teknis bahan material pilihan menggunakan BOF *Slag* dan EAF *Slag*, dimana spesifikasi ini hanya diperuntukkan bagi pembangunan jalan-jalan nasional, provinsi dan kabupaten/kota, dan tidak untuk pembangunan jalan - jalan pedesaan.

2.2 Zeolit Sintesis Aspha-Min

Zeolit Aspha-min merupakan salah satu jenis zeolit sintesis dengan merek dagang dari produk Euvoria Services GmbH di Jerman. Zeolit Aspha-min adalah Sodium-Aluminium-Silicate yang telah terkristalisasi secara hidrotermal menjadi serbuk yang halus. Aspha-min terdiri dari 21% air dan dicampurkan pada suhu 185⁰ – 360⁰ F. Zeolit Aspha-min merupakan Silikat dimana struktur pembentuknya memungkinkan untuk menampung Kation dalam jumlah besar, seperti Sodium, Kalsium dan Air. Karakteristik zeolit adalah kemampuannya untuk menghilangkan dan menyerap molekul air tanpa merusak strukturnya. Pemanasan dapat mengakomodir kandungan air dalam Zeolit. Dengan menambahkannya bersamaan dengan aspal pada suhu tertentu, semprotan air yang sangat halus sebagai air kristal dilepaskan ke campuran, menimbulkan efek peningkatan volume aspal yang terakumulasi sebagai *foam* aspal dan memungkinkan peningkatan *workability* dan ikatan dengan agregat pada suhu yang lebih rendah. Pada penelitian terdahulu, Zeolit Aspha-min dicampurkan pada kadar optimum 0,3% (Hopman, 2006).

2.3 Modulus Kekakuan

Pengujian ini dilakukan untuk mengetahui besarnya nilai modulus resilien dari campuran beraspal. Modulus resilien merupakan tingkat elastisitas dan kekakuan material (*stiffness*) yang secara teoritis didapat dari hubungan antara tegangan dan regangan suatu material. Modulus resilien dapat digunakan antara lain sebagai penilaian untuk memprediksi *stress*, *strain* dan *displacement*, serta dapat digunakan sebagai pendekatan perencanaan perkerasan maupun untuk mengevaluasi kinerja perkerasan.

Pada penelitian ini, besarnya modulus resilien campuran dilakukan dengan beban berulang (*Repeated Load*) menggunakan alat *Universal Material Testing Apparatus* (UMATTA) yang mengacu pada BS EN 12697-26-2004 Annex F. Pengujian ini termasuk pengujian yang tidak merusak benda uji karena beban yang diberikan relatif kecil. Alat UMATTA terdiri dari perangkat Control and Data Acquisition System (CDAS), perangkat komputer personal dan perangkat lunak yang terpadu.

2.4 Retak Lelah (*Fatigue*)

Kelelahan merupakan suatu fenomena timbulnya retak akibat beban berulang yang terjadi karena pengulangan tegangan atau regangan yang batasnya masih dibawah batas kekuatan material (Yoder dkk,1975). Besarnya tegangan atau regangan tergantung pada beban roda, kekakuan dan sifat dasar perkerasan secara keseluruhan.

Menurut SHRP-A-410 (1994). Metoda-metoda pengujian laboratorium yang cukup baik dan memungkinkan untuk digunakan dalam hal pengukuran sifat-sifat campuran yang mempengaruhi kinerja kelelahan adalah:

1. *Direct axial tensile* (tarikan langsung)
2. *Indirect tensile* (tarikan tidak langsung)
3. *Flexure fatigue test* (Uji kelelahan lentur) ; dengan 2 titik, 3 titik dan 4 titik lentur.
4. *Rotating bending* (momen putar)

Pengujian ketahanan terhadap *fatigue* dapat menggunakan alat *four point loading test*.

3. Metodologi Penelitian

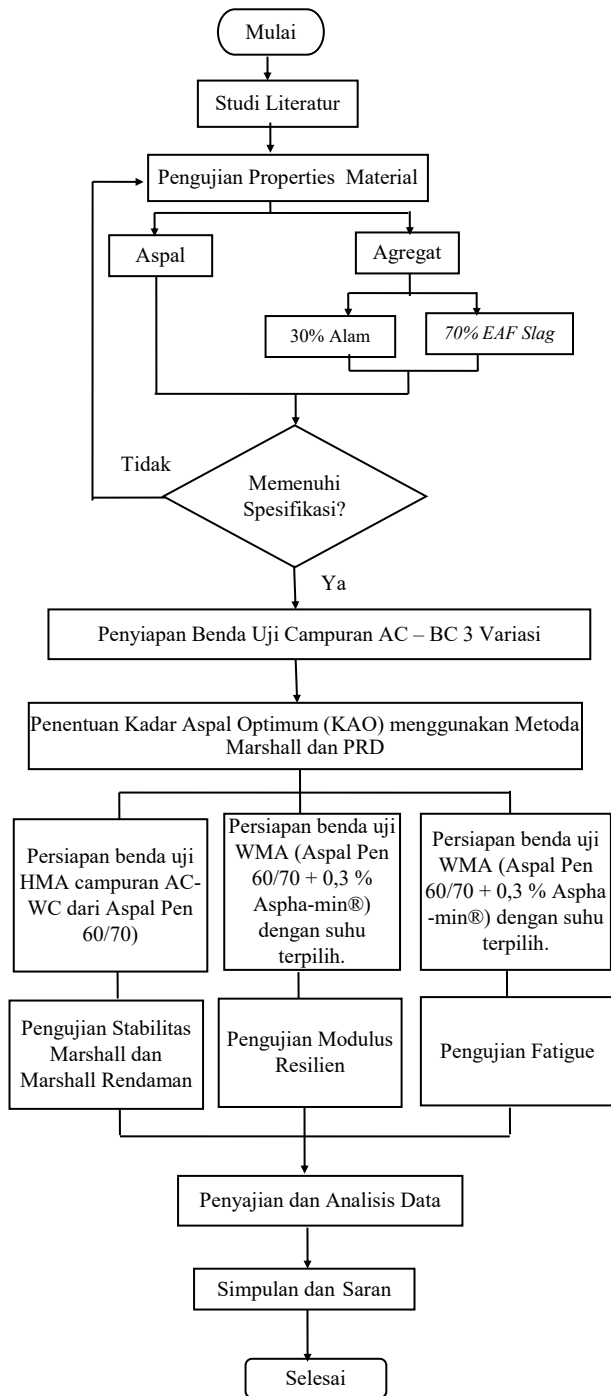
Metode yang digunakan dalam penelitian ini adalah metode eksperimental di laboratorium. Pengumpulan data primer dilakukan melalui serangkaian pengujian terhadap agregat, aspal dan campuran. Penelitian ini dilakukan di laboratorium Institut Teknologi Bandung dan Laboratorium Pusjatan Kementerian Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat. Secara garis besar, penelitian ini dapat dilihat dari diagram alir pada **Gambar 1**.

4. Penyajian dan Analisis Data

4.1 Stabilitas Marshall

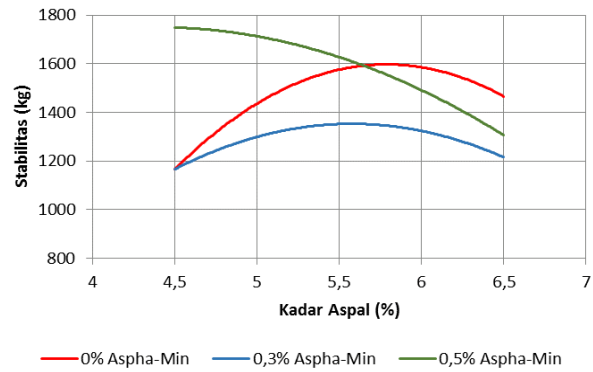
Stabilitas merupakan parameter empiris untuk mengetahui kemampuan lapisan perkerasan jalan dalam menahan Deformasi Permanen pada saat menerima beban lalu lintas tanpa terjadi perubahan bentuk tetap seperti gelombang, alur dan *bleeding* (Asphalt Institute, 1989). Faktor utama yang mempengaruhi nilai stabilitas suatu campuran adalah gradasi agregat dan kadar aspal. Nilai stabilitas menurut spesifikasi umum Bina Marga edisi 2010 revisi 3 dibatasi minimal sebesar 1000 kg untuk campuran Laston modifikasi. Perbandingan nilai stabilitas setiap campuran dapat dilihat pada **Gambar 2**.

Kadar Aspal Optimum merupakan kadar aspal yang menghasilkan campuran yang memenuhi semua unsur dari parameter semua parameter Marshall. Hubungan antara Kadar Aspal Optimum antara campuran aspal pen 60/70 dengan berbagai variasi Zeolit Aspha-Min dapat dilihat pada **Gambar 3**.

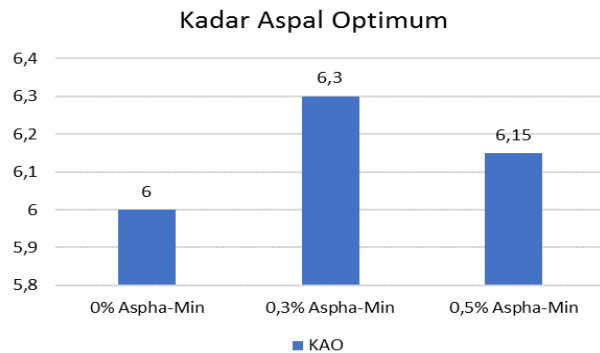


Gambar 1. Diagram alir penelitian

Dari **Gambar 3** terlihat bahwa nilai Kadar Aspal Optimum pada campuran AC-BC 0,3% Zeolit Aspha-Min menghasilkan nilai yang paling besar dari ketiganya dan campuran AC-BC 0% Zeolit Aspha-Min memiliki kadar aspal paling kecil, hal ini menunjukkan bahwa kemampuan mengalir aspal pen 60/70 tanpa tambahan aditif lebih baik sehingga tidak perlu banyak aspal untuk mengisi rongga. Selanjutnya, kadar aspal ini nantinya digunakan untuk penentuan suhu pencampuran dan pemadatan campuran *warm – mix*.



Gambar 2. Hasil pengujian stabilitas marshall



Gambar 3. Perbandingan nilai kadar aspal optimum (KAO)

4.2 Stabilitas Marshall Rendaman (*Immersion*)

Pengujian perendaman Marshall bertujuan untuk mengetahui ketahanan campuran terhadap pengaruh air, yang ditandai dengan hilangnya ikatan antara aspal dan butiran agregat, penting dalam mempertahankan stabilitas. Hasil pengujian seperti pada **Gambar 4** dan **Gambar 5**, tidak menunjukkan perbedaan hasil yang signifikan dari kedua campuran beraspal.

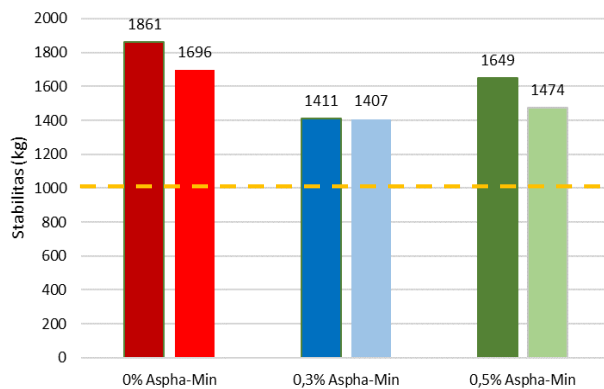
Dari hasil pengujian, terjadi penurunan nilai stabilitas setelah dilakukan perendaman selama 24 jam. Nilai Indeks Kekuatan Sisa (IKS) yang diperoleh untuk campuran beraspal AC-BC 0% Aspha-Min adalah sebesar 91,14% , campuran AC-BC 0,3% Aspha-Min sebesar 99,75% dan campuran AC-BC 0,5% Aspha-Min sebesar 89,37%. Hal ini menunjukkan bahwa campuran beraspal AC-BC 0,5% Aspha-Min tidak memenuhi spesifikasi persyaratan nilai IKS minimal 90%. Sedangkan campuran AC-BC 0,3% Aspha-Min memiliki kelekatan antara agregat dan aspal (*adhesive*) yang lebih baik, tahan terhadap pengaruh air dan suhu, serta menyebabkan campuran menjadi kedap air dan lebih awet karena tidak rentan terhadap pengelupasan.

4.3 Analisis Penentuan Suhu Pemadatan dan Pecampuran

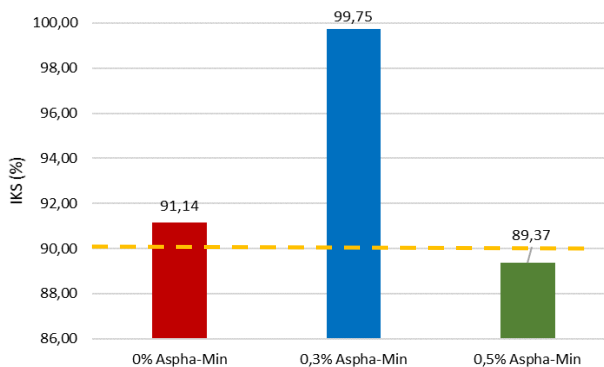
Untuk penentuan suhu pencampuran dan pemadatan dari campuran beraspal hangat AC-BC dengan zeolit

Tabel 1. Hasil pengujian marshall immersion

Sifat-sifat campuran	HMA (Variasi A0)	WMA (Variasi A3)	WMA (Variasi A5)
Kadar Aspal; %	6,00	6,30	6,15
Stabilitas perendaman standar (Kg), S1	1861	1411	1649
Stabilitas perendaman 24 jam (Kg), S2	1696	1407	1474
IKS (S2/S1 x 100); %	91,14	99,75	89,37



Gambar 4. Perbandingan nilai stabilitas standar dan stabilitas rendaman



Gambar 5. Perbandingan nilai Indeks Kekuatan Sisa

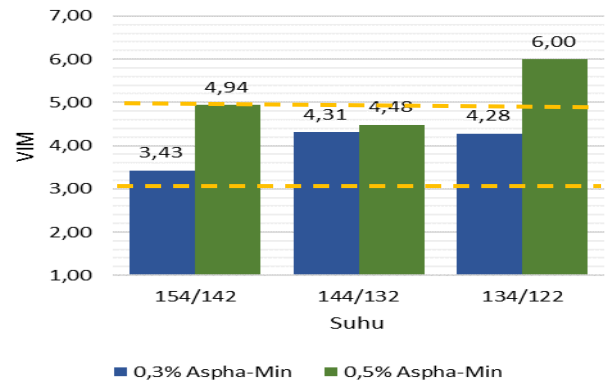
dilakukan dengan *trial and error*, dimana suhu pencampuran dan pemadatan diturunkan setiap 10° C sampai dengan 20° C dari suhu pemadatan dan pencampuran *hot-mix* berdasarkan nilai viskositasnya. Dalam hal ini tidak dilakukan pencampuran antara aspal dan Zeolit Aspha-Min dikarenakan kedua material ini tidak akan melebur menjadi satu karena zeolit adalah material sebagai pengganti *filler*.

Penambahan Zeolit Sintesis Aspha-Min terhadap nilai VIM, VMA, VFA, stabilitas dan *flow* dapat dilihat pada Gambar 6.

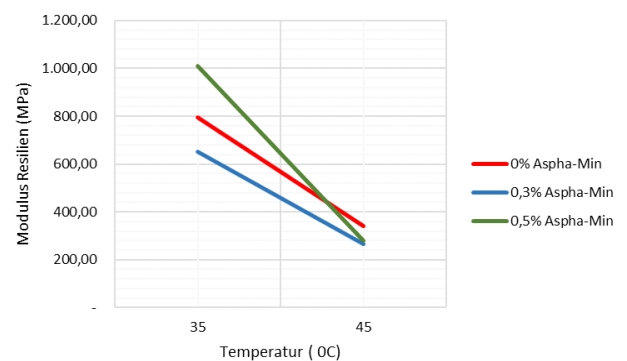
4.4 Analisis Data Pengujian Modulus

Modulus resilien merupakan modulus elastisitas yang didasarkan pada deformasi balik. Faktor aspal, gradasi, suhu dan waktu pembebanan memberikan pengaruh

terhadap modulus resilien. Semakin tinggi suhu maka semakin kecil nilai modulus resilien hal ini disebabkan karena aspal bersifat *visco-elastic* yaitu memiliki sifat dapat berubah dari *viscous* ke *elastic* atau sebaliknya akibat pengaruh suhu. Hasil pengujian pada suhu 45°C menunjukkan nilai Modulus Resilien yang paling kecil dibandingkan pengujian pada suhu 35°C dapat dilihat pada Gambar 7.



Gambar 6. Hubungan nilai VIM dan suhu



Gambar 7. Hubungan nilai modulus resilien dan suhu

Pada Tabel 2 menunjukkan persentase penurunan nilai Modulus Resilien terbesar terjadi pada peningkatan suhu pengujian dari 35°C menjadi 45°C pada campuran beraspal hangat dengan 0,5% Aspha-Min, hal ini menunjukkan bahwa penambahan Aspha-Min 0,5% membuat campuran lebih sensitif terhadap perubahan suhu hal ini ditunjukkan pada Gambar 7 dimana kemiringan (gradien) Campuran beraspal *warm-mix* AC-BC 0,5% Aspha-Min lebih curam dibandingkan kedua campuran lainnya.

Namun dari kedua jenis campuran aspal tersebut, campuran beraspal *warm-mix* AC-BC 0,5% Aspha-Min

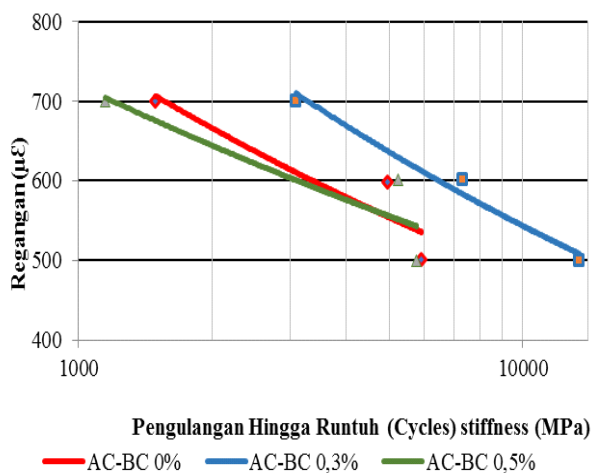
Tabel 2. Nilai modulus resilien pada suhu tertentu

Jenis Campuran	Modulus Resilien (Mpa)		%
	35°C	45°C	Penurunan
Hot Mix (0% Aspha-Min)	796	342	57,04%
Warm Mix (0,3% Aspha-Min)	650	265	59,23%
Warm Mix (0,5% Aspha-Min)	1010	279	72,38%

memiliki nilai yang lebih besar pada suhu 35°. Hal ini mungkin disebabkan karena semakin tinggi kadar zeolit akan mengoreksi gradasi campuran menjadi lebih halus. Semakin halus gradasi campuran semakin banyak aspal yang dibutuhkan sehingga pada saat suhu yang lebih tinggi, campuran semakin bersifat tidak kaku.

4.5 Analisis Data Pengujian *Fatigue*

Regangan yang diberikan pada campuran yang diuji terdiri dari 3 (tiga) tingkat regangan yaitu 500 $\mu\epsilon$, 600 $\mu\epsilon$, dan 700 $\mu\epsilon$. Pemilihan besar regangan ini didasarkan pada ketentuan AASHTO T 321-03 yang mensyaratkan nilai regangan berkisar antara 250 $\mu\epsilon$ – 750 $\mu\epsilon$. Namun pada kondisi di lapangan regangan yang terjadi lebih kecil dari 500 $\mu\epsilon$. Hubungan antara regangan dan umur kelelahan yang dilakukan hingga kondisi runtuh tercapai untuk setiap variasi campuran, disajikan dalam **Gambar 8**.



Gambar 8. Perbandingan umur kelelahan terhadap regangan hasil pengujian

Tabel 3. Perbandingan regangan tarik terhadap pengulangan hingga runtuh (cycles)

Jenis Campuran	Regangan Tarik ($\mu\epsilon$)	Tegangan Tarik (kPa)	Initial Flextural Stiffness	Pengulangan Hingga Runtuh (Cycles)
AC-BC 0%	501	2378	4751	5910
	599	2494	4161	4970
	700	2940	4199	1490
AC-BC 0,3%	499	2467	4948	13420
	602	3022	5019	7320
	701	3834	5470	3090
AC-BC 0,5%	500	2347	5146	5760
	602	3090	4698	5250
	701	2674	5136	1150

Pada **Gambar 8** menunjukkan hasil bahwa campuran AC-BC 0,3% Aspha-Min memiliki pengulangan hingga runtuh yang lebih besar dibandingkan

campuran lainnya. Sebelumnya dijelaskan bahwa baik campuran AC-BC 0% Aspha-Min dan AC-BC 0,5% Aspha-Min menghasilkan tegangan yang lebih kecil serta memiliki nilai modulus elastisitas yang lebih kecil, sehingga campuran AC-BC 0,3% Aspha-Min lebih lentur dibanding campuran lainnya. Karena campuran AC-BC 0,3% Aspha-Min lebih lentur, maka umur kelelahan haruslah lebih lama dibandingkan dengan campuran AC-BC lainnya.

5. Kesimpulan

Kesimpulan yang dapat diambil dari hasil pengolahan dan analisis data dalam penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Campuran beraspal AC-BC kadar Zeolit Aspha-Min 0% memiliki nilai Stabilitas Marshall yang lebih tinggi dibandingkan dengan kedua campuran lainnya, sedangkan Stabilitas Marshall Rendaman yang dinyatakan dalam Indeks Kekuatan Sisa (IKS) yang paling besar didapatkan dari Campuran beraspal AC-BC kadar Zeolit Aspha-Min 0,5% yaitu sebesar 99,75%. Sedangkan IKS untuk Campuran beraspal AC-BC kadar Zeolit Aspha-Min 0,5% tidak memenuhi spesifikasi yaitu sebesar 89,37%.
2. Penambahan Zeolit sintesis Aspha-Min dengan kadar 0,3% dapat menurunkan suhu pencampuran dan pemadatan sebesar 20°C. Sehingga suhu pencampuran dan pemadatan menjadi 134/122°C. Sedangkan Penambahan Zeolit sintesis Aspha-Min dengan kadar 0,5% terhadap campuran dapat menurunkan suhu pencampuran dan pemadatan sebesar 10°C saja sehingga suhu pencampuran dan pemadatan dapat diturunkan menjadi 144/132°C.
3. Berdasarkan hasil pengujian UMATTA, baik pada suhu 35°C maupun suhu 45°C, Campuran beraspal AC-BC kadar Zeolit Aspha-Min 0,3% memiliki nilai yang paling kecil dibandingkan dengan kedua campuran lainnya.
4. Campuran dengan kadar Aspha-Min 0,3% menghasilkan nilai Nf (ketahanan terhadap fatigue) yang paling rendah. Sehingga dapat disimpulkan bahwa dalam penelitian ini, dalam hal penurunan suhu pemadatan pencampuran maupun ketahanan terhadap retak lelah (fatigue) campuran optimum didapatkan dalam campuran EAF Slag 30% dengan penambahan aditif Aspha-Min sebesar 0,3%.

6. Saran

Berdasarkan hasil penelitian, diusulkan beberapa saran sebagai berikut:

1. Perlu dilakukan pengujian lanjutan untuk campuran beraspal hangat AC-BC dengan proporsi kadar *EAF Slag aggregate* dengan proporsi yang lebih kecil dari 30%.
2. Perlu dilakukan pengujian lanjutan untuk campuran beraspal hangat AC-BC dengan kadar zeolit 0,4% untuk mengetahui nilai optimum campuran
3. Perlu dilakukan pengujian lanjutan dengan bahan aditif lainnya seperti Sasobit, Evoterm, Rediset, dll

pada campuran beraspal hangat AC-BC dengan *EAF Slag Aggregate*.

Daftar Pustaka

- Ali, Seyed et al. 2014. *Evaluation of Long Term Ageing of Asphalt Mixture Containing EAF and BOF Steel Slag*. Iran : Ferdowsi University of Mashhad
- Ameri, Mahmoud dkk. 2013. *Laboratory evaluation of warm mix asphalt mixture containing electric arc furnace (EAF) steel slag*. Iran : Science Direct
- Asi, Ibrahim. 2007. *Evaluating skid resistance of different asphalt concrete mixes*. Jordan : The Hashemite University
- Asi, Ibrahim. 2007. *Use of steel slag aggregate in asphalt concrete mixes*. Kanada : Science Direct
- Asphalt Institute.1989. *The Asphalt Handbook. Manual Series No.4 (MS-4)*,The Asphalt Institute.
- Hopman, PC. 2006. *Properties of low temperature asphalt mixes using Aspha-Min*. Uthrech : KOAC NPC
- SHRP.1994. *Superior Performing Asphalt Pavements (Superpave)*. Washington : SHRP-A-410 National Research Council DC
- Subagio BS, Sinuhaji CA., Rahman H., 2018. *Kinerja Modulus Resilien dan Deformasi Permanen Dari Campuran Lataston Gradasi Senjang (HRS-WC) dengan Bahan Aspal Modifikasi Starbit E-55*. Bandung : Jurnal Teknik Sipil ISSN 0853-2982
- Tafti, Mohammad. 2016. *Experimental investigation of the effect of using different aggregate types on WMA mixture*. Iran : Science Direct
- Yoder, E.J., Witczak, M.W.1975 *Principles of Pavement Design. Second Edition*, USA: John Wiley & Sons, Inc.

