



**PENGEMBANGAN
TEKNOLOGI ADITIF UNTUK CAMPURAN BERASPAL
YANG MENGGUNAKAN RAP DAN ASBUTON**



Ir. Nono, M.Eng.Sc

**PENGEMBANGAN
TEKNOLOGI ADITIF UNTUK CAMPURAN BERASPAL
YANG MENGGUNAKAN RAP DAN ASBUTON**



PENGEMBANGAN TEKNOLOGI ADITIF UNTUK CAMPURAN BERASPAL YANG MENGGUNAKAN RAP DAN ASBUTON

Desember, 2015

Cetakan Ke-1, 2015 (78 halaman)

©Pemegang Hak Cipta Pusat Penelitian dan Pengembangan Jalan dan Jembatan

No. ISBN :

Kode Kegiatan :

Kode Publikasi :

Kata Kunci : Teknologi Perkerasan Lentur

Penulis:

Ir. Nono, M.Eng.Sc

Editor:

Prof. Dr. Ir. H. R. Anwar Yamin, M.Sc, ME.

Naskah ini disusun dengan sumber dana APBN Tahun 2015, pada paket pekerjaan Pengembangan Teknologi Aditif Campuran Beraspal Panas.

Pandangan yang disampaikan di dalam publikasi ini tidak menggambarkan pandangan dan kebijakan Kementerian Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat, unsur pimpinan, maupun institusi pemerintah lainnya.

Kementerian Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat tidak menjamin akurasi data yang disampaikan dalam publikasi ini, dan tanggung jawab atas data dan informasi sepenuhnya dipegang oleh penulis.

Kementerian Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat mendorong percetakan dan memperbanyak informasi secara eksklusif untuk perorangan dan pemanfaatan nonkomersil dengan pemberitahuan yang memadai kepada Kementerian Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat. Pengguna dibatasi dalam menjual kembali, mendistribusikan atau pekerjaan kreatif turunan untuk tujuan komersil tanpa izin tertulis dari Kementerian Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat.

Diterbitkan oleh:

Kementerian Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat
Badan Penelitian dan Pengembangan
Pusat Penelitian dan Pengembangan Jalan dan Jembatan
Jl. A.H. Nasution No. 264 Ujungberung – Bandung 40293

Pemesanan melalui:

Perpustakaan Puslitbang Jalan dan Jembatan
info@pusjatan.pu.go.id

TENTANG PUSLITBANG JALAN DAN JEMBATAN

Puslitbang Jalan dan Jembatan (Pusjatan) adalah institusi riset yang dikelola oleh Badan Litbang Kementerian Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat Republik Indonesia. Lembaga ini mendukung Kementerian Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat dalam menyelenggarakan jalan dengan memastikan keberlanjutan keahlian, pengembangan inovasi dan nilai – nilai baru dalam pengembangan infrastruktur.

Pusjatan memfokuskan kepada penyelenggara jalan di Indonesia, melalui penyelenggaraan litbang terapan untuk menghasilkan inovasi teknologi bidang jalan dan jembatan yang bermuara pada standar, pedoman, dan manual. Selain itu, Pusjatan mengemban misi untuk melakukan advis teknik, pendampingan teknologi, dan alih teknologi yang memungkinkan infrastruktur Indonesia menggunakan teknologi yang tepat guna.

KEANGGOTAAN TIM TEKNIS DAN SUB TIM TEKNIS

TIM TEKNIS :

1. Prof. Dr. Ir. M. Sjahdanulirwan, M.Sc.
2. Prof. Dr. Ir. Furqon Affandi, M.Sc.
3. Prof. Dr. Ir. H. R. Anwar Yamin, M.Sc, ME.
4. Dr. Djoko Widajat, MSc.
5. Prof. Ir. Lanneke Trisanto, APU.
6. Ir. Agus Bari Sailendra. MT.
7. Ir. GJW Fernandez
8. Ir. Soedarmanto Darmonegoro

SUB TIM TEKNIS :

1. Prof. Dr. Ir. H. R. Anwar Yamin, M.Sc, ME.
2. Prof. Dr. Ir. M. Sjahdanulirwan, M.Sc.
3. Prof. Dr. Ir. Furqon Affandi, M.Sc.
4. Dr. Ir. Nyoman Suaryana, M.Sc
5. Dr. Djoko Widajat, M.Sc.
6. Dr. Ir. Siegfried, M.Sc.
7. Ir. Kurniadji, MT.
8. Ir. Nono, M.Eng Sc.

KATA PENGANTAR

Dari tahun ke tahun pada pembangunan dan pemeliharaan jalan, khususnya untuk perkerasan beraspal, kebutuhan aspal dan agregat selalu meningkat. Untuk memenuhi keperluan tersebut maka untuk aspal selalu mengimpor karena produk dalam negeri memiliki keterbatasan. Untuk mengatasi permasalahan tersebut di atas, maka perlu kajian untuk pengembangan teknologi campuran beraspal yang menggunakan asbuton yang depositnya cukup banyak sehingga dapat mengurangi terhadap kebutuhan aspal. Kita sadari bahwa asbuton merupakan aspal alam maka dalam pemanfaatannya perlu diolah terlebih dahulu dan menggunakan aditif sehingga memiliki karakteristik baik yang sesuai dengan kondisi lalu lintas dan lingkungan. Hal ini agar memiliki tingkat kemudahan kerja tinggi sehingga kinerja perkerasannya sesuai yang diharapkan.

Upaya lainnya yang dipandang dapat mengatasi permasalahan terbatasnya aspal dan mengurangi penggunaan agregat baru adalah khusus untuk pekerjaan pemeliharaan (perbaikan atau rekonstruksi) jalan dengan menggunakan metode *cut and fill*. Metoda ini merupakan *green technology* karena memanfaatkan limbah dari perkerasan jalan. Pemanfaatan RAP (*Reclaimed Asphalt Pavement*) ini dapat mengurangi penggunaan aspal baru sehingga dapat mengefisienkan pemakaian produk dari fraksi minyak bumi. Selain itu dapat menghemat penggunaan agregat baru yang keberadaannya makin lama makin berkurang. Untuk mengoptimalkan penggunaan RAP pada campuran beraspal salah satunya adalah dengan aditif *rejuvenator*. *Rejuvenator* merupakan suatu aditif dengan viskositas rendah yang dirancang untuk mengembalikan sifat-sifat aspal pada RAP dan untuk meningkatkan sifat-sifat campuran aspal yang mengandung RAP.

Bandung, Desember 2015

DAFTAR ISI

| | |
|---|----|
| KATA PENGANTAR..... | i |
| DAFTAR ISI..... | ii |
| DAFTAR TABEL..... | iv |
| DAFTAR GAMBAR..... | vi |
| 1. PENDAHULUAN | 1 |
| 2. KINERJA PERKERASAN BERASPAL..... | 2 |
| 3. PERKERASAN BERASPAL DENGAN DAUR ULANG (RAP) | 5 |
| 3.1. Aditif <i>Rejuvenator</i> | 6 |
| 3.2. Metoda Pembuatan Rancangan Campuran Beraspal Panas Menggunakan RAP..... | 7 |
| 3.3. Spesifikasi Campuran Beraspal Panas..... | 17 |
| 4. ASBUTON | 18 |
| 4.1. Deposit Asbuton | 18 |
| 4.2. Karakteristik Asbuton | 19 |
| 4.3. Spesifikasi Asbuton dan Campuran Beraspal Hangat Asbuton..... | 21 |
| 5. SIFAT CAMPURAN BERASPAL PANAS DENGAN RAP HASIL KAJIAN SEKALA LABORATORIUM | 24 |
| 5.1. Sifat Bahan | 24 |
| 5.1.1. Sifat RAP | 24 |
| 5.1.2. Sifat Agregat | 27 |
| 5.1.3. Sifat Bahan Pengikat..... | 28 |
| 5.1.4. Sifat Bahan Peremaja (<i>Rejuvenator</i>)..... | 29 |
| 5.1.5. Sifat Aspal Pen 60 Setelah Ditambah Variasi Bahan Peremaja..... | 30 |
| 5.1.6. Penggunaan RAP dalam Campuran Beraspal Panas dan Bahan Peremaja..... | 38 |
| 5.2. Gradasi Campuran Beraspal Panas Rencana Dengan Atau Tanpa RAP | 40 |
| 5.3. Sifat Campuran Beraspal Panas Rencana Dengan Atau Tanpa RAP..... | 41 |
| 5.3.1. Pengaruh penambahan RAP Terhadap Temperatur Campuran Beraspal | 41 |
| 5.3.2. Sifat Campuran Beraspal Panas Tanpa dan Dengan RAP | 42 |
| 5.4. Pembahasan Campuran Beraspal Panas Rencana Dengan Atau Tanpa RAP | 58 |
| 6. SIFAT CAMPURAN BERASPAL HANGAT ASBUTON HASIL KAJIAN SEKALA LABORATORIUM | 63 |

| | |
|---|----|
| 6.1. Sifat Bahan | 63 |
| 6.1.1. Sifat Asbuton | 63 |
| 6.1.2. Sifat Bahan Peremaja Hangat | 66 |
| 6.2. Gradasi Campuran Berapal Hangat Asbuton | 69 |
| 6.3. Sifat Campuran Beraspal Hangat Asbuton..... | 70 |
| 6.4. Pembahasan Campuran Berapal Hangat Asbuton | 75 |
| 7. PENUTUP | 76 |
| DAFTAR PUSTAKA..... | 77 |



DAFTAR TABEL

| | | |
|-------------|---|----|
| Tabel 3-1. | Pengaruh RAP pada temperatur campuran | 6 |
| Tabel 3-2. | Pengaruh RAP pada karakteristik campuran | 6 |
| Tabel 3-3. | Spesifikasi aspal berdasarkan kelas kinerja | 8 |
| Tabel 3-4. | Kelas aspal yang direkomendasikan sesuai proporsi RAP | 11 |
| Tabel 3-5. | Ketentuan gradasi agregat campuran beraspal panas | 17 |
| Tabel 3-6. | Ketentuan campuran beraspal panas..... | 18 |
| Tabel 4-1. | Hasil uji gradasi mineral asbuton..... | 20 |
| Tabel 4-2. | Unsur kimia mineral asbuton Kabungka dan Lawele | 20 |
| Tabel 4-3. | Unsur kimia bitumen asbuton Kabungka dan Lawele | 21 |
| Tabel 4-4. | Karakteristik asbuton butir | 22 |
| Tabel 4-5. | Ketentuan gradasi agregat campuran beraspal hangat asbuton | 23 |
| Tabel 4-6. | Ketentuan peremaja campuran beraspal hangat asbuton..... | 23 |
| Tabel 4-7. | Ketentuan campuran beraspal hangat dengan Asbuton..... | 24 |
| Tabel 5-1. | Sifat RAP dari Bogor dan Cikampek..... | 25 |
| Tabel 5-2. | Hubungan tempertatur dengan $G^*/\sin(\delta)$ untuk RAP dari Bogor dan Cikampek..... | 25 |
| Tabel 5-3. | Temp tinggi kritis $\{T_{C(T)}\}$ dan temp menengah kritis $\{T_{C(M)}\}$ untuk RAP dari Bogor dan Cikampek..... | 27 |
| Tabel 5-4. | Sifat agregat..... | 28 |
| Tabel 5-5. | Sifat Aspal Pen 60-70 | 29 |
| Tabel 5-6. | Sifat bahan peremaja..... | 30 |
| Tabel 5-7. | Sifat bahan pengikat Aspal Pen 60 ditambah variasi MG | 31 |
| Tabel 5-8. | Sifat bahan pengikat Aspal Pen 60 ditambah variasi OLI | 32 |
| Tabel 5-9. | Sifat bahan pengikat Aspal Pen 60 ditambah variasi RejIRE1 | 33 |
| Tabel 5-10. | Sifat bahan pengikat Aspal Pen 60 ditambah variasi RejIRE2 | 34 |
| Tabel 5-11. | Proporsi RAP yang diijinkan dan komposisi aspal baru berdasarkan temperatut tinggi kritis $\{T_{C(T)}\}$ | 39 |
| Tabel 5-12. | Proporsi RAP yang diijinkan dan komposisi aspal baru berdasarkan temperatut menengah kritis $\{T_{C(M)}\}$ | 39 |
| Tabel 5-13. | Gradasi agregat campuran Laston..... | 40 |
| Tabel 5-14. | Sifat campuran beraspal panas tanpa dan dengan 10% RAP bahan pengikat Aspal Pen 60-70..... | 45 |

| | | |
|-------------|--|----|
| Tabel 5-15. | Sifat campuran beraspal panas dengan 20% RAP dipanaskan 60 °C dengan bahan pengikat Aspal Pen 60-70 ditambah <i>Rejuvenator</i> | 46 |
| Tabel 5-16. | Sifat campuran beraspal panas dengan 30% RAP dipanaskan 75 °C dengan bahan pengikat Aspal Pen 60-70 ditambah <i>Rejuvenator</i> | 47 |
| Tabel 5-17. | Ketahanan deformasi campuran beraspal panas dengan dan tanpa RAP dengan variasi bahan pengikat | 49 |
| Tabel 5-18. | Hubungan antara nilai regangan tarik dan umur kelelahan (<i>cycles</i>) untuk campuran beraspal panas dengan dan tanpa RAP dengan variasi bahan pengikat | 55 |
| Tabel 6-1. | Sifat Asbuton LGA hasil ekstraksi..... | 63 |
| Tabel 6-2. | Hasil pengujian DSR Asbuton LGA | 65 |
| Tabel 6-3. | Sifat fisik peremaja hangat (SC-1000) untuk campuran beraspal hangat dengan Asbuton..... | 67 |
| Tabel 6-4. | Sifat fisik peremaja hangat (SC-3000) untuk campuran beraspal hangat dengan Asbuton..... | 68 |
| Tabel 6-5. | Gradasi agregat campuran beraspal hangat asbuton | 69 |
| Tabel 6-6. | ifat campuran beraspal hangat dengan peremaja hangat 1000 (SC-1000)..... | 73 |
| Tabel 6-7. | Sifat campuran beraspal hangat dengan peremaja hangat SC-3000 | 74 |

DAFTAR GAMBAR

| | | |
|--------------|---|----|
| Gambar 2-1. | Indikator terjadinya kerusakan perkerasan..... | 2 |
| Gambar 3-1. | Hubungan Antara Pengujian dan Kinerja Aspal..... | 11 |
| Gambar 4-1. | Lokasi penambahan asbuton..... | 19 |
| Gambar 5-1. | Hubungan temperatur tinggi kritis RAP Bogor dengan $G^*/\sin(\delta)$ | 26 |
| Gambar 5-2. | Hubungan temperatur tinggi kritis RAP Cikampek dengan $G^*/\sin(\delta)$ | 26 |
| Gambar 5-3. | Viskositas dan titik nyala keempat peremaja..... | 30 |
| Gambar 5-4. | Hubungan antara nilai penetrasi dengan penambahan variasi <i>rejuvenator</i> | 35 |
| Gambar 5-5. | Hubungan antara nilai titik lembek dengan penambahan variasi <i>rejuvenator</i> | 35 |
| Gambar 5-6. | Hubungan antara nilai nilai viskositas dengan penambahan variasi <i>rejuvenator</i> | 35 |
| Gambar 5-7. | Hubungan antara temperatur tinggi kritis benda uji fresh dengan penambahan variasi <i>rejuvenator</i> | 37 |
| Gambar 5-8. | Hubungan antara temperatur tinggi kritis benda uji setelah RTFOT dengan penambahan variasi <i>rejuvenator</i> | 37 |
| Gambar 5-9. | Hubungan antara temperatur menengah kritis benda uji setelah PAV dengan penambahan variasi <i>rejuvenator</i> | 37 |
| Gambar 5-10. | Variasi gradasi campuran rencana | 40 |
| Gambar 5-11. | Variasi proporsi dan temperatur RAP terhadap temperatur campuran beraspal panas dengan Aspal Pe 60-70..... | 41 |
| Gambar 5-12. | Penurunan temperatur campuran beraspal | 41 |
| Gambar 5-13. | Stabilitas Marshall campuran beraspal panas tanpa dan dengan variasi RAP | 43 |
| Gambar 5-14. | Pelelehan dan VIM campuran beraspal panas tanpa dan dengan variasi RAP | 44 |
| Gambar 5-15. | Stabilitas sisa Marshall campuran beraspal panas tanpa dan dengan variasi RAP | 44 |
| Gambar 5-16. | Ketahanan deformasi campuran beraspal panas tanpa dan dengan variasi RAP | 50 |
| Gambar 5-17. | Nilai deformasi awal campuran beraspal panas tanpa dan dengan variasi RAP | 50 |

| | | |
|--------------|---|----|
| Gambar 5-18. | Nilai deformasi total campuran beraspal panas tanpa dan dengan variasi RAP | 51 |
| Gambar 5-19. | Stabilitas dinamis campuran beraspal panas tanpa dan dengan variasi RAP | 51 |
| Gambar 5-20. | Alat <i>Beam Fatigue Apparatus</i> (BFA) atau <i>Four Point Bending Apparatus</i> | 52 |
| Gambar 5-21. | Hubungan antara nilai regangan tarik dan umur kelelahan (cycles) untuk campuran beraspal panas dengan dan tanpa RAP dengan variasi bahan pengikat | 57 |
| Gambar 5-22. | Modulus campuran beraspal panas dengan dan tanpa RAP dengan variasi bahan pengikat | 57 |
| Gambar 6-1. | Hubungan tempertaur tinggi kritis LGA dengan $G^*/\sin(\delta)$ | 65 |
| Gambar 6-2. | Hubungan tempertaur menengah kritis LGA dengan $G^*\sin(\delta)$ | 66 |
| Gambar 6-3. | Variasi gradasi campuran rencana | 69 |
| Gambar 6-4. | Stabilitas Marshall campuran beraspal hangat asbuton dengan proporsi asbuton 5% dan 10% dengan peremaja 3 tipe SC-3000 | 71 |
| Gambar 6-5. | Pelelehan dan VIM campuran beraspal hangat asbuton dengan proporsi asbuton 5% dan 10% dengan peremaja 3 tipe SC-3000 | 71 |
| Gambar 6-6. | Stabilitas sisa Marshall campuran beraspal hangat asbuton dengan proporsi asbuton 5% dan 10% dengan peremaja 3 tipe SC-3000 | 72 |

1. PENDAHULUAN

Pada umumnya ruas-ruas jalan di Indonesia menggunakan teknologi perkerasan lentur atau perkerasan beraspal, yaitu lebih dari 90% dari seluruh panjang jalan yang ada. Untuk pembangunan dan pemeliharaan perkerasan beraspal pada setiap tahunnya selalu import aspal, padahal Indonesia memiliki aspal alam (asbuton) yang depositnya cukup banyak. Kita sadari bahwa asbuton merupakan aspal alam maka dalam pemanfaatannya perlu diolah terlebih dahulu sehingga memiliki karakteristik baik yang sesuai dengan kondisi lalu lintas dan lingkungan, hal ini agar memiliki tingkat kemudahan kerja tinggi sehingga kinerja perkerasannya sesuai yang diharapkan.

Teknologi campuran beraspal dengan memanfaatkan asbuton yang telah dikembangkan sampai dengan saat ini adalah mencakup teknologi campuran beraspal untuk lalu lintas berat, sedang dan rendah. Teknologi asbuton ini telah diterapkan pada ruas-ruas jalan Nasional, Propinsi serta pada ruas-ruas jalan Kabupaten dan Kota. Tipe teknologi yang telah dikembangkan pada umumnya proporsi penggunaan asbutonnya masih relatif sedikit sehingga perlu dikembangkan terus sehingga diperoleh teknologi campuran yang dapat memanfaatkan asbuton lebih optimal namun memiliki karakteristik campurannya baik sesuai dengan kondisi lalu lintas dan lingkungan.

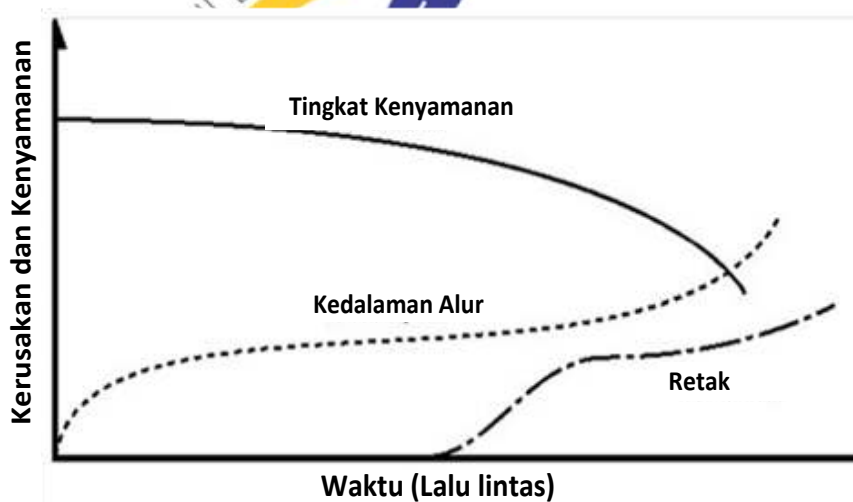
Alternatif yang lainnya untuk mengatasi kendala kekurangan aspal adalah pemanfaatan RAP (*Reclaimed Asphalt Pavement*), khususnya untuk pekerjaan pemeliharaan (perbaikan atau rekonstruksi) jalan dengan menggunakan metode *cut and fill*. Metoda ini merupakan *green technology* karena memanfaatkan limbah dari perkerasan jalan. Pemanfaatan RAP ini dapat mengurangi penggunaan aspal baru sehingga dapat mengefisienkan pemakaian produk dari fraksi minyak bumi. Selain itu dapat menghemat penggunaan agregat baru yang keberadaannya makin lama makin berkurang.

Menurut Dirjen Bina Marga, jaringan jalan nasional yang mengalami rusak berat masih sekitar 11%, sedangkan yang rusak ringan (8%) dan rusak sedang (31%) dari total panjang jalan nasional sepanjang 34.628 km (Sony, 2015). Berdasarkan data di atas untuk periode awal pembangunan perkerasan jalan, akan memperoleh RAP kurang lebih sebanyak 1,5 juta m³ dari hasil pengerukan jalan yang rusak berat.

Pemanfaat RAP terus dikembangkan di seluruh dunia, di antaranya pemanfaatan secara langsung RAP dengan mengembalikan kondisi karakteristik bitumennya mendekati bitumen baru. Teknologi yang sekarang masih dilakukan pengembangan dan diaplikasikan adalah penggunaan aditif pemulih bitumen aspal (*rejuvenator*). Pada tulisan ini dibahas tentang pemanfaatan RAP dan Asbuton Lawele untuk campuran beraspal sehingga diharapkan dapat bermanfaat bagi penyelenggara/pengelola jalan

2. KINERJA PERKERASAN BERASPAL

Kinerja perkerasan akan menurun karena pengaruh lingkungan dan beban lalu lintas. Kerusakan perkerasan biasanya diukur secara tidak langsung dengan menilai kenyamanan (*riding quality*), jenis kerusakan struktur tersebut, seperti kedalaman alur dan retak permukaan (Wirtgen, 2004). Gambar 2-1 menunjukkan bagaimana tiga fitur ini biasanya berhubungan dengan perjalanan waktu dan efek kumulatif dari beban lalu lintas. Tahapan kerusakan perkerasan seperti disebabkan oleh kombinasi antara faktor lingkungan dan beban lalu lintas dibahas di bawah.



Gambar 2-1. Indikator terjadinya kerusakan perkerasan
(Sumber: Wirtgen, 2004)

Faktor lingkungan

Faktor lingkungan yang sebagian besar mengakibatkan terjadinya retak yang dimulai dari permukaan. Penyumbang utama fenomena ini adalah radiasi ultraviolet dari sinar matahari yang mengakibatkan penuaan (pengerasan) aspal. Dengan pengerasan aspal sehingga elastisitasnya berkurang yang mengakibatkan terjadinya retak ketika permukaan perkerasan pada kondisi dingin. Setelah kinerja permukaan perkerasan telah hilang karena retak, perkerasan cenderung memburuk semakin meningkat karena masuknya air.

Pengaruh lalu lintas

Beban lalu lintas dapat menyebabkan terjadinya alur pada jejak roda dan retak pada struktur perkerasan. Setiap kendaraan yang menggunakan jalan menyebabkan struktur perkerasan secara lambat mengalami deformasi. Deformasi yang disebabkan oleh kendaraan ringan adalah sangat kecil sehingga tidak signifikan, sementara kendaraan berat menyebabkan deformasi relatif besar. Makin banyak kendaraan memiliki efek kumulatif yang secara bertahap menyebabkan deformasi permanen dan atau kelelahan retak. Sumbu beban kendaraan yang berlebih mempercepat kerusakan pada struktur perkerasan.

Penurunan kondisi pada struktur perkerasan disebabkan oleh dua mekanisme yang berbeda, yaitu:

- ✓ Deformasi permanen yang disebabkan oleh densifikasi, di mana tekanan beban berulang menyebabkan individu partikel dalam lapisan perkerasan bergerak lebih dekat atau rapat, yang mengakibatkan hilangnya rongga. Dalam material berbutir, kehilangan rongga menyebabkan peningkatan kekuatan (bahan padat lebih kuat), tapi sebaliknya pada campuran beraspal. Penurunan kadar rongga pada campuran beraspal tidak hanya menyebabkan rutting di jejak roda, tetapi memungkinkan aspal mulai bertindak sebagai pelumas, menciptakan media untuk tekanan hidrolik yang akan dihasilkan dari beban roda. Hal ini menyebabkan perpindahan lateral (pergeseran), atau mendorong sepanjang tepi jejak roda; dan
- ✓ Retak leleh pada material berpengikat, dimana retak ini mulai dari bagian bawah lapisan beraspal dimana beban roda kendaraan menyebabkan terjadinya regangan tarik maksimum pada tebi bawah lapis beraspal, selanjutnya merambat ke permukaan perkerasan. Deformasi permanen dari lapisan yang terletak di

bawah lapis beraspal memperburuk kondisi ini, karena semakin meningkatkan regangan tarik pada lapis beraspal yang diakibatkan oleh beban roda.

Lapis permukaan adalah perkerasan yang bersentuhan langsung dengan lalu lintas dan lingkungan. Lapis permukaan berfungsi untuk melindungi lapis fondasi dan tanah dasar, memberikan keawetan (durabilitas) dan kedap air.

Lalu lintas mempengaruhi lapis permukaan dalam dua cara, yaitu:

- ✓ Tekanan disampaikan di permukaan dengan beban roda yang terutama di bidang vertikal, tetapi komponen horisontal menjadi signifikan di tikungan, pada daerah turunan dan di mana kendaraan mengerem. Karakteristik kekuatan bahan yang digunakan dalam lapis permukaan harus mampu menahan semua tekanan tersebut tanpa retak atau deformasi; dan
- ✓ Pengaruh gesekan roda kendaraan, khususnya ketika menikung, cenderung mengikis permukaan, sehingga dapat terjadi pengausan yang berpengaruh terhadap pengurangan ketahanan gesekan (*skid resistance*) dari lapis permukaan. Lapis permukaan menjadi licin saat basah dan bisa berbahaya.

Pengaruh lingkungan terhadap lapis permukaan dapat dibagi menjadi dua, yaitu pengaruh termal dan radiasi ultraviolet. Oleh karena itu, lapis permukaan perlu memiliki sifat sebagai berikut:

- ✓ Elastisitas dan tidak peka akibat perubahan temperatur; dan
- ✓ Daya tahan yang baik terhadap radiasi ultraviolet tanpa penuaan dini.

Pada umumnya ada dua faktor yang hampir selalu terjadinya kerusakan lubang pada permukaan perkerasan, yaitu air dan lalu lintas. Lalu lintas berat atau faktor-faktor lain dapat membuat retak, yang memungkinkan air untuk meresap ke dalam dasar jalan aspal sehingga daya dukung perkerasan menjadi lemah. Ketika perkerasan atau lapis pondasi dan atau tanah dasar tidak dapat mendukung beban lalu lintas kerusakan perkerasan berkembang menjadi kerusakan lebih berat.

3. PERKERASAN BERASPAL DENGAN DAUR ULANG (RAP)

Salah satu metoda untuk mengatasi atau meningkatkan struktur perkerasan jalan beraspal adalah metoda daur ulang. Penggunaan metode daur ulang untuk mengatasi permasalahan perbaikan jalan atau rekonstruksi jalan dapat menghemat penggunaan aspal dan batuan, serta tidak merusak geometri jalan akibat penumpukan lapisan perkerasan yang terus menerus (Sumantri dkk., 2014).

Penurunan sifat fisik RAP selama pada masa layan dapat dimanfaatkan untuk bahan perkerasan jalan, dengan menambahkan RAP dengan jumlah yang terbatas pada campuran beraspal baru (Novita dkk., 2011). Secara umum perkerasan daur ulang (*recycling*) memanfaatkan kembali material (agregat dan aspal) perkerasan lama untuk dijadikan sebagai perkerasan baru yang ditambahkan material baru atau dan bahan peremaja. Material yang digunakan untuk metode daur ulang adalah bahan kupasan aspal dan bila diperlukan ditambahkan aspal dan agregat baru. Bahan kupasan aspal ini mengandung aspal dan agregat lama. Untuk mencapai hasil yang memadai pada umumnya aspal dan agregat lama perlu diperbaharui baik sifat-sifatnya maupun gradasinya (Novita dkk., 2011).

Aspal RAP secara signifikan telah mengalami penuaan pada saat diproduksi, pelayanan terhadap beban kendaraan, dan pengaruh lingkungan saat menjadi lapisan/struktur perkerasan. Hal ini dikarenakan reologi aspal telah teroksidasi dan mempunyai kelelahan, sehingga aspal pada RAP menjadi mengeras (O'Sullivan, 2011).

Pengolahan RAP secara konvensional adalah menambahkan binder baru sehingga aspal pada RAP mempunyai reologi sedikit lebih rendah dari binder baru akan tetapi mempunyai kekakuan yang lebih tinggi (Lehtimäki, 2012).

Hasil kajian yang telah dilakukan oleh Suaryana (2008) pengaruh penambahan RAP pada campuran beraspal panas lapis antara (AC-BC) adalah makin banyak penggunaan RAP makin besar penurunan pada temperatur campuran (lihat Tabel 3-1). Pengaruh RAP pada karakteristik campuran sesuai Tabel 3-2 terlihat semakin banyak penggunaan RAP serta kadar airnya semakin tinggi maka nilai stabilitas Marshall dan stabilitas dinamis menurun.

Tabel 3-1. Pengaruh RAP pada temperatur campuran

| No | Uraian | 10% RAP dengan Variasi Kadar Air: | | | | 15% RAP dengan Variasi Kadar Air: | | | | 20% RAP dengan Variasi Kadar Air: | | | |
|----|---------------------|-----------------------------------|-------|-------|-------|-----------------------------------|-------|-------|-------|-----------------------------------|-------|-------|-------|
| | | 0% | 2% | 4% | 6% | 0% | 2% | 4% | 6% | 0% | 2% | 4% | 6% |
| 1 | Temperatur Agregat | 170,0 | 170,0 | 170,0 | 170,0 | 170,0 | 170,0 | 170,0 | 170,0 | 170,0 | 170,0 | 170,0 | 170,0 |
| 2 | Temperatur RAP | 30,0 | 30,0 | 30,0 | 30,0 | 30,0 | 30,0 | 30,0 | 30,0 | 30,0 | 30,0 | 30,0 | 30,0 |
| 3 | Temperatur Aspal | 155,0 | 155,0 | 155,0 | 155,0 | 155,0 | 155,0 | 155,0 | 155,0 | 155,0 | 155,0 | 155,0 | 155,0 |
| 4 | Temperatur Campuran | | | | | | | | | | | | |
| | Awal | 146,8 | 144,9 | 143,3 | 123,3 | 141,9 | 133,5 | 129,0 | 122,2 | 137,4 | 130,4 | 119,7 | 113,9 |
| | 1 menit | 146,8 | 144,9 | 143,3 | 123,3 | 141,9 | 133,5 | 128,9 | 122,2 | 137,4 | 130,4 | 118,3 | 113,9 |
| | 2 menit | 146,8 | 144,8 | 143,4 | 123,3 | 141,9 | 134,4 | 128,8 | 122,2 | 137,4 | 130,4 | 118,2 | 113,8 |
| | 5 menit | 146,8 | 144,6 | 143,4 | 122,0 | 142,1 | 134,1 | 128,6 | 121,9 | 137,4 | 130,3 | 117,2 | 112,4 |
| | 10 menit | 146,6 | 144,3 | 142,8 | 120,3 | 141,9 | 133,7 | 128,1 | 121,4 | 137,2 | 129,8 | 115,4 | 108,4 |
| | 15 menit | 146,3 | 143,8 | 141,9 | 119,1 | 141,8 | 132,4 | 127,4 | 120,3 | 136,9 | 129,9 | 114,4 | 102,2 |
| | 30 menit | 143,8 | 141,0 | 137,9 | 114,8 | 138,4 | 129,4 | 123,7 | 116,9 | 133,2 | 124,4 | 112,7 | 99,1 |
| | 45 menit | 138,5 | 135,1 | 132,4 | 109,6 | 132,7 | 123,6 | 119,9 | 112,4 | 126,9 | 119,3 | 106,7 | 97,1 |
| | 60 menit | 132,1 | 128,1 | 125,8 | 104,5 | 125,2 | 119,7 | 114,0 | 107,2 | 118,8 | 112,9 | 102,6 | 94,2 |

Sumber: Suaryana (2008)

Tabel 3-2. Pengaruh RAP pada karakteristik campuran

| No | Karakteristik Campuran | Hasil Pengujian untuk Variasi Proporsi RAP Dalam Campuran | | |
|----|--|---|-------------|-------------|
| | | 10% RAP | 15% RAP | 20% RAP |
| 1 | Kadar Aspal RAP; % | 5,4 | 5,4 | 5,4 |
| 2 | Temperatur Agregat; °C | 180 | 180 | 180 |
| 3 | Temperatur Aspal; °C | 150 | 150 | 150 |
| 4 | Temperatur RAP | Temp. Ruang | Temp. Ruang | Temp. Ruang |
| 5 | Temperatur Setelah Pencampuran; °C | 151 | 148 | 142 |
| 6 | Kadar Aspal Optimum; % | 5,90 | 5,90 | 5,90 |
| 7 | Kepadatan; gr/cc | 2,347 | 2,350 | 2,337 |
| 8 | Rongga dalam Mineral Agregat; % | 16,23 | 16,12 | 16,59 |
| 9 | Rongga dalam campuran (VIM) Marshall; % | 3,29 | 3,80 | 4,14 |
| 10 | Rongga dalam campuran (VIM) pada kepadatan membal (PRD); % | - | - | - |
| 11 | Rongga Terisi Bitumen (VFB); % | 79,7 | 76,4 | 75,0 |
| 12 | Stabilitas; kg | 843,1 | 838,9 | 789,0 |
| 13 | Kelelahan; mm | 4,01 | 4,36 | 4,95 |
| 14 | Marshall Quotient; kg/mm | 211,8 | 195,5 | 162,4 |
| 15 | Stabilitas Dinamis; Lintasan/mm | 1615,4 | 2520,0 | 1615,4 |

Sumber: Suaryana (2008)

3.1. Aditif Rejuvenator

Aditif *rejuvenator* merupakan suatu peremaja bahan pengikat untuk RAP di mana didalamnya terkandung dan tersusun senyawa aromatik ringan, untuk menggantikan senyawa aromatik ringan yang menguap atau teroksidasi pada RAP. Kemampuan senyawa aromatik ringan dari *rejuvenator* harus dapat menembus lapisan aspal dan berdifusi pada RAP sehingga dapat merekonstruksi aspal yang telah menua menjadi bahan lapis perkerasan baru (Qiu dkk., 2013). *Rejuvenator* merupakan

suatu aditif dengan viskositas rendah yang dirancang untuk mengembalikan sifat-sifat RAP-pengikat dan untuk meningkatkan sifat-sifat campuran aspal yang mengandung RAP. Peremajaan ideal tidak hanya mengembalikan sifat mekanik aspal, tetapi juga mengoreksi komposisi kimia dari aspal usia (Lehtimäki, 2012). Pelumas dan solar dapat digunakan sebagai *rejuvenator* dengan ditambahkan beberapa bagian dari asbuton butir dan karakteristik yang dihasilkannya dapat digunakan untuk komponen lapisan latasir (Sumantri dkk., 2014). Bahan *rejuvenator* dari senyawa aromatik yang sangat ringan dapat meningkatkan ketahanan terhadap retak pada temperatur rendah dan deformasi permanen (Lehtimäki, 2012).

Ekstrak senyawa aromatik pada peremajaan konvensional merupakan suatu molekul aromatik polar yang dominan, dengan kandungan sekitar 75% campuran minyak dan resin dengan sedikit minyak jenuh (Yu dkk., 2014).

Bahan pengikat daur ulang dari bahan petrokimia yang asli, minyak goreng dan bitumen aspal yang lembek dengan penetrasi 160/220 dapat digunakan sebagai bahan *rejuvenator* (Dony dkk., 2012).

3.2. Metoda Pembuatan Rancangan Campuran Beraspal Panas Menggunakan RAP

Berdasarkan spesifikasi aspal berdasarkan kelas kinerja (*Performance Grade*, PG), jenis pengujian aspalnya yaitu mengukur sifat-sifat fisik yang dapat dikaitkan langsung dengan kinerja di lapangan menurut prinsip-prinsip teknis. Selain itu, pengujian aspal berdasarkan kelas kinerja juga dilakukan pada temperatur perkerasan di lapangan. Pada Tabel 3-3 ditunjukkan jenis pengujian aspal berdasarkan kinerja (AASHTO M 320) serta tujuan pengujian dalam kaitannya dengan spesifikasi aspal *superpave*, sedangkan pada Gambar 3-1 ditunjukkan hubungan antara jenis pengujian dengan kinerja aspal.

Tabel 3-3. Spesifikasi aspal berdasarkan kelas kinerja

| KELAS KINERJA | PG 46 | | | PG 52 | | | | | | | PG 58 | | | | | PG 64 | | | | | |
|--|-------|------|------|-------|------|------|------|------|------|------|-------|------|------|------|------|-------|------|------|------|------|------|
| | -34 | -40 | -46 | -10 | -16 | -22 | -28 | -34 | -40 | -46 | -16 | -22 | -28 | -34 | -40 | -10 | -16 | -22 | -28 | -34 | -40 |
| Rata-rata Temperatur Maksimum Perkerasan Selama 7 hari | >46 | | | >52 | | | | | | | >58 | | | | | >64 | | | | | |
| Temperatur Minimum Perkerasan: °C ^a | >-34 | >-40 | >-46 | >-10 | >-16 | >-22 | >-28 | >-34 | >-40 | >-46 | >-16 | >-22 | >-28 | >-34 | >-40 | >-10 | >-16 | >-22 | >-28 | >-34 | >-40 |
| Aspal Asli | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Titik Nyala, T 48: Minimum °C | 230 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Viskositas, ASTM D 4402: ^b Maksimum 3 Pa (3000 cP), Temperatur pengujian, °C | 135 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Dynamic shear, T 315: ^c G*/sin δ ^d , Minimum 1,00 kPa Temperatur Pengyjian, @ 10 rad/detik, °C | 46 | | | 52 | | | | | | | 58 | | | | | 64 | | | | | |
| Rolling Thin Film Oven (T 240) atau Thin Film Oven (T 179) Residue | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Kehilangan Berat, ^e Maksimum, % | 1.00 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Dynamic shear, T 315: G*/sin δ ^d , Minimum 2,20 kPa Temperatur Pengyjian, @ 10 rad/detik, °C | 46 | | | 52 | | | | | | | 58 | | | | | 64 | | | | | |
| Pressure Aging Vesse; Residue (PP1) | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Temperatur Penuaan PAV, °C ^f | 90 | | | 90 | | | | | | | 100 | | | | | 100 | | | | | |
| Dynamic shear, T 315: G* sin δ ^d , Minimum 5000 kPa Temperatur Pengyjian, @ 10 rad/detik, °C | 10 | 7 | 4 | 25 | 22 | 19 | 16 | 13 | 10 | 7 | 25 | 22 | 19 | 16 | 12 | 31 | 28 | 25 | 22 | 19 | 16 |
| | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Creep Stiffness, T 313: ^g S, Maksimum, 300 Pa m-value, Minimum, 0,300 Temperatur Pengyjian, @ 10 rad/detik, °C | -24 | -30 | -36 | 0 | -6 | -12 | -18 | -24 | -30 | -36 | -6 | -12 | -18 | -24 | -30 | 0 | -6 | -12 | -18 | -24 | -30 |
| Direct Tension, T 314: ^h S, Maksimum, 300 Pa Failure to Strain, Minimum, 1,0% Temperatur Pengyjian, @ 1,0 nn/mnt, °C | -24 | -30 | -36 | 0 | -6 | -12 | -18 | -24 | -30 | -36 | -6 | -12 | -18 | -24 | -30 | 0 | -6 | -12 | -18 | -24 | -30 |

Tabel 2-4. Spesifikasi aspal berdasarkan kelas kinerja (lanjutan)

| KELAS KINERJA | PG 70 | | | | | | PG 76 | | | | | PG 82 | | | | |
|--|-----------|------|------|------|------|------|-----------|------|------|------|------|-----------|------|------|------|------|
| | -10 | -16 | -22 | -28 | -34 | -40 | -10 | -16 | -22 | -28 | -34 | -10 | -16 | -22 | -28 | -34 |
| Rata-rata Temperatur Maksimum Perkerasan Selama 7 hari | >70 | | | | | | >76 | | | | | >82 | | | | |
| Temperatur Minimum Perkerasan: °C ^a | >-10 | >-16 | >-22 | >-28 | >-34 | >-40 | >-10 | >-16 | >-22 | >-28 | >-34 | >-10 | >-16 | >-22 | >-28 | >-34 |
| Aspal Asli | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Titik Nyala, T 48: Minimum °C | 230 | | | | | | | | | | | | | | | |
| Viskositas, ASTM D 4402: ^b Maksimum 3 Pa (3000 cP), Temperatur pengujain, °C | 135 | | | | | | | | | | | | | | | |
| Dynamic shear, T 315: ^c G*/sin δ ^d , Minnimum 1,00 kPa Temperatur Pengyjian, @ 10 rad/detik, °C | 70 | | | | | | 76 | | | | | 82 | | | | |
| Rolling Thin Film Oven (T 240) atau Thin Film Oven (T 179) Residue | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Kehilangan Berat, ° Maksimum, % | 1.00 | | | | | | | | | | | | | | | |
| Dynamic shear, T 315: G*/sin δ ^d , Minnimum 2,20 kPa Temperatur Pengyjian, @ 10 rad/detik, °C | 70 | | | | | | 76 | | | | | 82 | | | | |
| Pressure Aging Vesse; Residue (PP1) | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Temperatur Penuaan PAV, °C ^f | 100 (110) | | | | | | 100 (110) | | | | | 100 (110) | | | | |
| Dynamic shear, T 315: G* sin δ ^d , Minnimum 5000 kPa Temperatur Pengyjian, @ 10 rad/detik, °C | 34 | 31 | 28 | 25 | 22 | 19 | 37 | 34 | 31 | 28 | 25 | 40 | 37 | 34 | 31 | 28 |
| Creep Stiffness, T 313: ^g S, Maksimum, 300 Pa m-value, Minimum, 0,300 Temperatur Pengyjian, @ 10 rad/detik, °C | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | 0 | -6 | -12 | -18 | -24 | -30 | -0 | -6 | -12 | -18 | -24 | -0 | -6 | -12 | -18 | -24 |
| Direct Tension, T 314: ^g S, Maksimum, 300 Pa Failure to Strain, Minimum, 1,0% Temperatur Pengyjian, @ 1,0 nn/mnt, °C | 0 | -6 | -12 | -18 | -24 | -30 | -0 | -6 | -12 | -18 | -24 | -0 | -6 | -12 | -18 | -24 |

^a Temperatur perkerasan dapat diestimasi dari temperatur udara dengan menggunakan algoritma yang terdapat dalam program LTPP, atau dapat diperoleh dari lembaga tertentu, atau mengikuti prosedur yang diuraikan pada AASHTO M 323 dan AASHTO R 35.

^b Persyaratan ini mungkin dihilangkan (atas petunjuk lembaga yang ditunjuk), asalkan pemasok menjamin bahwa aspal dapat dipompa dan dicampur pada temperatur yang memenuhi standar keselamatan yang berlaku.

^c Untuk keperluan pengendalian mutu produksi aspal tidak dimodifikasi, pengujian viskositas aspal asli dapat diganti dengan pengujian *dynamic shear* G*/sin δ pada temperatur dimana aspal merupakan cairan Newtonian.

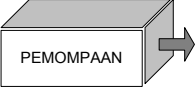


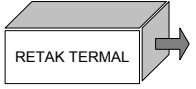
^d $G^*/\sin \delta$ = kekakuan temperatur tinggi dan $G^* \sin \delta$ = kekakuan temperatur menengah

^e Perubahan berat tidak boleh kurang dari 1%, baik untuk perubahan positif (kenaikan massa) atau negatif (kehilangan massa)

^f Temperatur penuaan PAV didasarkan pada simulasi kondisi cuaca dan merupakan salah satu dari tiga temperatur 90^o C, 100^o C, atau 110^o C. Temperatur penuaan PAV umumnya adalah 100^o C untuk PG 58-xx dan kelas di atasnya, kecuali untuk cuaca gurun, temperatur penuaan PAV untuk PG 70-xx dan kelas di atasnya dapat ditetapkan 110^o C

^g Apabila kekakuan rangkai di bawah 300 MPa, maka pengujian tarik langsung tidak diperlukan. Bila kekakuan rangkai antara 300 dan 600 MPa, maka persyaratan regangan runtuk tarik langsung dapat digunakan sebagai persyaratan kekakuan rangkai. Pada kedua kasus tersebut, persyaratan nilai-m harus dipenuhi.



| PERALATAN PENGUJIAN | SIFAT-SIFAT KINERJA |
|--------------------------------------|--|
| <i>Rotational Viscometer (RV)</i> |  Pengaliran (<i>flow</i>) |
| <i>Dynamic Shear Rheometer (DSR)</i> |  Alur |
| |  Retak struktural |
| <i>Bending Beam Rheometer (BBR)</i> |  Retak pada temperatur rendah |
| <i>Direct Tension Tetster (DTT)</i> | |

Gambar 3-1. Hubungan Antara Pengujian dan Kinerja Aspal

Salah satu metode yang disarankan untuk meningkatkan daya tahan campuran beraspal panas dengan proporsi RAP tinggi adalah untuk menyesuaikan kelas pengikat baru yang akan digunakan. AASHTO M323 telah merekomendasikan penggunaan bahan pengikat baru didasarkan pada persentase penggunaan RAP (lihat Tabel 3-4).

Tabel 3-4. Kelas aspal yang direkomendasikan sesuai proporsi RAP

| Penggunaan RAP (%) | Kelas Aspal Baru Yang Direkomendasikan |
|--------------------|--|
| < 15 | Tidak ada perubahan kelas aspal baru |
| 15-25 | Pilih aspal baru dengan kelas satu tingkat lebih rendah (lebih lunak) dari Aspal yang biasa digunakan (misal, pilih PG 58 bilamana yang biasa digunakan PG 64) |
| >25 | Direkomendasikan menggunakan Grafik Pencampuran (<i>blending charts</i>) |

Cara Pembuatan Grafik Pencampuran

1) Pencampuran Bahan Pengikat RAP

Pencampuran bahan pengikat RAP dapat dicapai dengan mengetahui kelas terakhir yang dikehendaki (temperatur

kritis) dari campuran bahan pengikat (aspal), sifat fisik (dan temperatur kritis) dari bahan pengikat RAP hasil pemulihan, dan baik sifat fisik (dan temperatur kritis) dari bahan pengikat aspal baru atau persentase RAP yang diijinkan dalam campuran.

2) Menentukan Sifat Fisik Dan Temperatur Kritis Bahan Pengikat RAP

- a. Memulihkan bahan pengikat RAP menggunakan dengan pelarut yang sesuai. Setidaknya 50 g bahan pengikat RAP hasil pemulihan yang diperlukan untuk pengujian. Lakukan pengujian klasifikasi bahan pengikat menggunakan tes sesuai AASHTO M 320. Viskositas Rotasi (*Rotational viscosity*), titik nyala, dan tes kehilangan berat tidak diperlukan.
- b. Lakukan pengujian DSR asli pada bahan pengikat RAP hasil pemulihan untuk menentukan temperatur tinggi kritis $\{T_{C(T)}\}$, berdasarkan nilai-nilai DSR asli di mana $G^*/\sin \delta = 1,00$ kPa. Hitung temperatur tinggi kritis sebagai berikut:

- a) Menentukan kurva kemiringan Kekakuan-Temperatur (a) sebagai berikut:

$$a = \Delta \log (G^*/\sin \delta) / \Delta T \quad \dots\dots\dots (1)$$

- c. Tentukan $\{T_{C(T)}\}$ hingga mendekati 0,1 °C dengan menggunakan persamaan berikut:

$$T_{C(T)} = \frac{\{\text{Log}(1,00) - \text{Log}(G_1)\}}{a} + T_1 \quad \dots\dots\dots (2)$$

Keterangan:

$G_1 = G^*/\sin \delta$ nilai pada temperatur spesifik T_1 , dan
 a = Kemiringan seperti yang dijelaskan dalam Persamaan 1.

Catatan 1 - Meskipun setiap temperatur (T_1) dan kekakuan yang sesuai (G_1) dapat dipilih, hal ini disarankan untuk menggunakan $G^*/\sin \delta$ nilai paling dekat dengan kriteria (1,00 kPa) untuk meminimalkan kesalahan ekstrapolasi.

- d. Lakukan penuaan dengan *Rolling Thin-Film Oven* (RTFO) pada bahan pengikat yang tersisa.
- e. Melakukan pengujian DSR pada bahan pengikat hasil pemulihan yang telah mengalami penuaan dengan RTFO untuk menentukan temperatur tinggi kritis (berdasarkan DSR-RTFO). Hitung temperatur tinggi kritis (DSR-RTFO).
 - a) Menentukan kurva kemiringan Kekakuan-Temperatur sebagai berikut:

$$a = \Delta \log (G^*/\sin \delta) / \Delta T \quad \dots\dots\dots (3)$$

- b) Menentukan $T_{C(T)}$ berdasarkan DSR-RTFO, hingga mendekati $0,1^\circ \text{C}$ dengan menggunakan persamaan berikut:

$$T_{C(T)} = \frac{\{\text{Log}(2,20) - \text{Log}(G_1)\}}{a} + T_1 \quad \dots\dots\dots (4)$$

Keterangan:

$G_1 = G^*/\sin \delta$ nilai pada temperatur T spesifik, dan

a = Kemiringan seperti yang dalam Persamaan 3.

Catatan 2 - Meskipun setiap temperatur (T_1) dan kekakuan yang sesuai (G_1) dapat dipilih, disarankan untuk menggunakan $G^*/\sin \delta$ nilai paling dekat dengan kriteria (2,20 kPa) untuk meminimalkan kesalahan ekstrapolasi.

- f. Tentukan temperatur tinggi kritis dari bahan pengikat RAP hasil pemulihan merupakan temperatur tinggi kritis terendah dari DSR asli dan DSR-RTFO. Tentukan temperatur tinggi kelas kinerja (PG) dari bahan pengikat RAP hasil pemulihan sehingga berdasarkan data tersebut dapat diperoleh temperatur tinggi kritis tunggal.
 - g. Lakukan pengujian DSR temperatur menengah pada bahan pengikat RAP yang diperoleh hasil penuaan dengan RTFO untuk menentukan temperatur kritis menengah $T_{C(M)}$, seolah-olah bahan pengikat RAP yang telah mengalami penuaan dengan *pressure aging vessel* (PAV).

- a) Menentukan kurva kemiringan Kekakuan-temperatur sebagai berikut:

$$a = \Delta \log (G^*/\sin \delta) / \Delta T \dots\dots\dots (5)$$

- b) Tentukan $T_{C(M)}$ hingga 0,1 °C dengan menggunakan persamaan berikut:

$$T_{C(M)} = \frac{\{\text{Log}(5000) - \text{Log}(G_1)\}}{a} + T_1 \dots\dots\dots (6)$$

Keterangan:

$G_1 = G^*/\sin \delta$ nilai pada temperatur T_1 spesifik, dan

a = Kemiringan seperti yang dalam Persamaan 5.

Catatan 3 - Meskipun setiap temperatur (T_1) dan kekakuan yang sesuai (G_1) dapat dipilih, disarankan untuk menggunakan $G^*/\sin \delta$ nilai paling dekat dengan kriteria (5000 kPa) untuk meminimalkan kesalahan ekstrapolasi.

- h. Melakukan pengujian BBR pada bahan pengikat RAP hasil pemulihan yang telah mengalami penuaan dengan RTFO untuk menentukan temperatur rendah kritis $\{T_{C(R)}\}$ atau $T_{C(M)}$ berdasarkan kekakuan BBR atau nilai m.

- a) Menentukan kurva kemiringan Kekakuan-Temperatur sebagai berikut

$$a = \Delta \log (S) / \Delta T \dots\dots\dots (7)$$

- b) Tentukan $T_{C(R)}$ hingga 0,1 °C dengan menggunakan persamaan berikut:

$$T_{C(R)} = \frac{\{\text{Log}(300) - \text{Log}(S_1)\}}{a} + T_1 \dots\dots\dots (8)$$

Keterangan:

S = Nilai S pada temperatur spesifik T_1 , dan

a = Kemiringan seperti yang dalam Persamaan 7.

Catatan 4 - Meskipun setiap temperatur (T_1) dan kekakuan yang sesuai (S_1) dapat dipilih, disarankan untuk menggunakan nilai paling dekat dengan kriteria (300 MPa) untuk meminimalkan kesalahan ekstrapolasi.

- c) Menentukan kurva kemiringan Nilai m-Temperatur sebagai berikut:

$$a = \Delta \text{ Nilai-}m / \Delta T \dots\dots\dots (9)$$

- d) Tentukan $T_{C(M)}$ hingga 0,1 °C dengan menggunakan persamaan berikut:

$$T_{C(M)} = \frac{(0,300-m_1)}{a} + T_1 \dots\dots\dots (10)$$

Keterangan:

S = Nilai m pada temperatur spesifik T_1 , dan

a = Kemiringan seperti yang dalam Persamaan 9.

Catatan 5 - Meskipun setiap temperatur (T_1) dan sesuai Nilai m (m_1) dapat dipilih, disarankan untuk menggunakan Nilai m terdekat dengan kriteria (0,300) untuk meminimalkan kesalahan ekstrapolasi.

- e) Pilih yang tertinggi dari dua temperatur rendah kritis, $T_{C(R)}$ atau $T_{C(M)}$, untuk mewakili temperatur kritis rendah untuk bahan pengikat aspal hasil pemulihan $T_{C(R)}$. Tentukan PG temperatur rendah dari bahan pengikat RAP hasil pemulihan berdasarkan temperatur rendah kritis tunggal.

- i. Setelah sifat fisik dan temperatur kritis dari bahan pengikat hasil pemulihan diketahui, lanjutkan dengan pencampuran dengan persentase RAP diketahui atau dengan kelas bahan pengikat baru.

3) Pencampuran Pada Persentase RAP Yang Telah Diketahui

Jika hasil akhir pencampuran (*blending*) kelas bahan pengikat diperoleh, persentase RAP diketahui, dan sifat bahan pengikat hasil pemulihan dari RAP yang diketahui, maka sifat kelas aspal baru dapat ditentukan.

- a. Menentukan temperatur kritis bahan pengikat aspal baru pada propertis tinggi, menengah, dan rendah menggunakan persamaan berikut:

$$T_{\text{baru}} = \frac{T_{\text{blend}} - (\% \text{ RAP} \times T_{\text{RAP}})}{(1 - \% \text{ RAP})} \dots\dots\dots (11)$$

Keterangan:

- T_{baru} = Temperatur kritis (tinggi, menengah dan rendah) bahan pengikat aspal baru;
- T_{blend} = Temperatur kritis (tinggi, menengah dan rendah) bahan pengikat aspal hasil pencampuran (*final desired*);
- % RAP = Persentase RAP yang dalam decimal; dan
- T_{RAP} = Temperatur kritis (tinggi, menengah dan rendah) bahan pengikat RAP hasil pemulihan.

- b. Menggunakan Persamaan 11 untuk temperatur kritis (tinggi, menengah, dan rendah) secara berturut-turut sifat bahan pengikat aspal baru yang dibutuhkan dapat ditentukan.

4) **Pencampuran Dengan Bahan Pengikat Baru Yang Diketahui**

Jika hasil akhir pencampuran kelas bahan pengikat, sifat kelas bahan pengikat aspal baru, dan bahan pengikat RAP hasil pemulihan diketahui, maka persentase RAP yang diijinkan dapat ditentukan.

- a. Menentukan persentase RAP yang diijinkan dengan menggunakan persamaan sebagai berikut:

$$\% \text{ RAP} = \frac{T_{blend} - T_{baru}}{T_{RAP} - T_{baru}} \dots\dots\dots (12)$$

Keterangan:

- T_{baru} = Temperatur kritis (tinggi, menengah dan rendah) bahan pengikat aspal baru;
- T_{blend} = Temperatur kritis (tinggi, menengah dan rendah) bahan pengikat aspal hasil pencampuran (*final desired*);
- T_{RAP} = Temperatur kritis (tinggi, menengah dan rendah) bahan pengikat RAP hasil pemulihan.

- b. Menggunakan Persamaan 12 untuk temperatur kritis (tinggi, menengah, dan rendah) secara berturut-turut persentase RAP diijinkan yang akan dapat ditentukan.

3.3. Spesifikasi Campuran Beraspal Panas

Untuk tujuan pengembangan teknologi aditif campuran beraspal panas dengan memanfaatkan RAP, bahan acuan untuk pengujian campuran beraspal adalah:

- Sifat agregat dan aspal keras yang digunakan mengacu Spesifikasi Umum Bidang Jalan dan Jembatan Tahun 2010 Revisi-3 (Direktorat Jenderal Bina Marga, 2014).
- Gradasi agregat untuk campuran beraspal panas dan hangat mengacu mengacu Spesifikasi Umum Bidang Jalan dan Jembatan Tahun 2010 Revisi-3 (Direktorat Jenderal Bina Marga, 2014), lihat Tabel 3-5.
- Ketentuan campuran beraspal panas mengacu pada Tabel 3-6 (Spesifikasi Umum Bidang Jalan dan Jembatan Tahun 2010 Revisi-3 (Direktorat Jenderal Bina Marga, 2014).
- Persiapan benda uji untuk pengujian Marshall mengacu pada ASTM D6926-10 dan pengujian parameter Marshall sesuai SNI 2489:2014.

Tabel 3-5. Ketentuan gradasi agregat campuran beraspal panas

| Ukuran ayakan | Persen berat lolos terhadap total agregat dalam campuran | | |
|--------------------|--|---------|---------|
| | Laston (AC) | | |
| | WC | BC | Base |
| 1 ½ in (37,5 mm) | | | 100 |
| 1 in (25 mm) | | 100 | 90--100 |
| ¾ in (19 mm) | 100 | 90--100 | 76--90 |
| ½ in (12,5 mm) | 90--100 | 75--90 | 60--78 |
| 3/8 in (9,5 mm) | 77--90 | 66--82 | 52--71 |
| No. 4 (4,75 mm) | 53--69 | 46--64 | 35--54 |
| No. 8 (2,36 mm) | 33--53 | 30--49 | 23--41 |
| No. 16 (1,18 mm) | 21--40 | 18--38 | 14--30 |
| No. 30 (0,6 mm) | 14--30 | 12--28 | 10--22 |
| No. 50 (0,3 mm) | 9--22 | 7--20 | 6--15 |
| No. 100 (0,15 mm) | 6--15 | 5--13 | 4--10 |
| No. 200 (0,075 mm) | 4--10 | 4--8 | 3--7 |

Tabel 3-6. Ketentuan campuran beraspal panas

| Sifat-sifat campuran | Laston | | |
|---|----------|----------|--|
| | WC | BC | Base |
| Jumlah tumbukan per bidang | 75 | | 112 ⁽¹⁾ |
| Rasio agregat lolos ayakan 0,075 mm dengan kadar aspal efektif | 0,6--1,4 | | |
| Rongga dalam campuran (VIM), % | 3,0—5,0 | | |
| Rongga dalam agregat (VMA), % | Min. 14 | Min. 13 | Min. 12 |
| Rongga terisi aspal (VFB), % | Min. 65 | Min. 65 | Min. 65 |
| Stabilitas marshall, kg | Min. 800 | Min. 800 | Min. 1800 ⁽¹⁾ |
| Pelelehan, mm | 2--4 | | 3,5 ⁽¹⁾ -- 5,5 ⁽¹⁾ |
| Tensile Strength Ratio (TSR) pada VIM 7% ± 0,5% ⁽²⁾ , % | Min. 80 | | |
| Rongga dalam campuran pada kepadatan membal (<i>refusal</i>) ⁽³⁾ , % | Min. 2 | | |

CATATAN:

(1) Modifikasi Marshall sesuai ASTM D 5581-07a (diameter benda uji 15 cm)

(2) Untuk mendapatkan VIM 7% ± 0,5%, buat benda uji Marshall dengan variasi tumbukan pada kadar aspal optimum, misal 2x40, 2x50, 2x60 dan 2x75 tumbukan. Kemudian dari setiap benda uji tersebut, hitung nilai VIM dan buat hubungan antara jumlah tumbukan dan VIM. Dari grafik tersebut dapat diketahui jumlah tumbukan yang memiliki nilai VIM 7% ± 0,5%, kemudian lakukan pengujian ITS untuk mendapatkan *tensile strength ratio* (TSR) sesuai SNI 6753:2008 atau AASTHO T283-07 tanpa pengondisian -18 ± 3 °C. Jika alat pengujian TSR tidak tersedia maka lakukan pengujian stabilitas sisa setelah perendaman selama 24 jam, 60 °C (%) dengan ketentuan minimal 90% yang diuji pada nilai VIM optimum.

(3) Untuk menentukan kepadatan membal (*refusal*), disarankan menggunakan penumbuk bergetar (*vibratory hammer*) agar pecahnya butiran agregat dalam campuran dapat dihindari.

4. ASBUTON

4.1. Deposit Asbuton

Asbuton atau aspal alam batu buton dari pulau Buton Sulawesi Tenggara merupakan salah satu sumber daya alam di Indonesia yang memiliki potensi yang sangat besar. Asbuton memiliki defosit terbesar di dunia dibandingkan dengan aspal alam negara lain. Untuk itu, asbuton merupakan anugerah yang luar biasa dan bila dimanfaatkan dengan optimal dapat meningkatkan kesejahteraan rakyat Indonesia, namun pemanfaatan asbuton tidak mudah diperlukan inovasi dan usaha keras dari seluruh komponen bangsa ini. Pemanfaatan asbuton sudah dimulai sejak jaman penjajahan

hingga sekarang serta sudah dilakukan oleh banyak pihak, namun hasilnya masih belum sesuai harapan. Padahal bila penggunaan asbuton dapat dilakukan dengan optimal maka akan berdampak positif bagi negara dan daerah, yaitu diantaranya:

- a. Dapat menghemat devisa negara dari penggunaan import aspal minyak
- b. Dapat mengantisipasi kemungkinan menurunnya produksi aspal minyak dalam negeri di masa yang akan datang
- c. Dapat digunakan sebagai bahan tambah untuk meningkatkan mutu aspal produk dalam negeri
- d. Dapat membuka lapangan kerja baru, khususnya bagi masyarakat di Pulau Buton.

Dari sekian banyak lokasi deposit Asbuton, baru lokasi penambangan Kabungka saja yang telah ditambang dan dimanfaatkan, daerah lokasi penambangan lainnya seperti daerah Lawele, baru dalam tahap eksplorasi dan sedikit pemanfaatannya. Sejak tahun dua ribuan, barulah deposit Asbuton dari Lawele ditambang, dan penambangan untuk kedua sumber dilakukan dengan cara penambangan terbuka, seperti diilustrasikan pada Gambar 4-1.



a. Lokasi di Kabungka



b. Lokasi di Lawele

Gambar 4-1. Lokasi penambangan asbuton

4.2. Karakteristik Asbuton

Seperti telah diketahui, dalam Asbuton terdapat dua jenis unsur utama, yaitu bitumen dan mineral. Kadar bitumen asbuton bervariasi antara 10% dan 50% dengan lokasi tersebar dari Teluk Sampolawa sampai dengan Teluk Lawele sepanjang 75 km dengan lebar 27 km (Dairi. 1992). Di dalam pemanfaatannya untuk pekerjaan peraspalan, kedua jenis unsur tersebut akan sangat

dominan mempengaruhi kinerja campuran beraspal. Hasil pengujian dan analisis kimia hasil ekstraksi Asbuton dari Kabungka dan Lawele diperlihatkan pada Tabel 4-1 sampai Tabel 4-3.

Pada Tabel 4-1 terlihat bahwa ukuran mineral asbuton dari kedua sumber setelah diekstraksi ukuran butirnya halus, yaitu untuk asbuton dari Kabungka memiliki ukuran butir maksimum 0,30 mm, sedangkan ukuran butir maksimum untuk asbuton Lawele adalah 2,36 mm.

Tabel 4-1. Hasil uji gradasi mineral asbuton

| Ukuran Saringan | | Persentase berat lolos saringan | |
|-----------------|-------|---------------------------------|--------------|
| ASTM | mm | Asbuton dari | Asbuton dari |
| No.8 | 2,36 | 100 | 100 |
| No.30 | 0,60 | 100 | 99,1 |
| No.50 | 0,30 | 100 | 89,1 |
| No.100 | 0,150 | 95,6 | 49,3 |
| No.200 | 0,075 | 4,5 | 32,2 |

Sumber: Kusnianti (2002)

Tabel 4-2. Unsur kimia mineral asbuton Kabungka dan Lawele

| Senyawa | Hasil uji kimia mineral | |
|---|-------------------------|--------------|
| | Asbuton dari | Asbuton dari |
| CaCO_3 | 86,66 | 72,90 |
| MgCO_3 | 1,43 | 1,28 |
| CaSO_4 | 1,11 | 1,94 |
| CaS | 0,36 | 0,52 |
| H_2O | 0,99 | 2,94 |
| SiO_2 | 5,64 | 17,06 |
| $\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$ | 1,52 | 2,31 |
| Residu | 0,96 | 1,05 |

Sumber: Kusnianti (2002)

Tabel 4-3. Unsur kimia bitumen asbuton Kabungka dan Lawele

| Senyawa | Hasil uji kimia mineral | |
|-------------------------|-------------------------|---------------------|
| | Asbuton dari kabungka | Asbuton dari Lawele |
| Nitrogen (N),% | 29,04 | 30,08 |
| Acidafins (A1), % | 9,33 | 6,60 |
| Acidafins (A2), % | 12,98 | 8,43 |
| Parafin (P), % | 11,23 | 8,86 |
| Parameter Maltene | 1,50 | 2,06 |
| Nitrogen/Parafin, N/P | 2,41 | 3,28 |
| Kandungan Asphaltene, % | 39,45 | 46,92 |

Sumber: Kusnianti (2002)

Dari Tabel 4-2 terlihat bahwa sifat kimia mineral asbuton dari kedua sumber memiliki CaCO_3 tinggi, Kandungan CaCO_3 mineral asbuton dari Kabungka lebih tinggi dari yang dari Lawele, namun demikian mineral asbuton dari Lawele mengandung silika (SiO_2) lebih tinggi. Pengaruh kandungan CaCO_3 yang tinggi memberikan nilai tambah ketahanan terhadap pengelupasan. Dengan demikian penggunaan asbuton dari Kabungka pada campuran beraspal akan meningkatkan daya tahan campuran beraspal terhadap pengaruh air.

Berdasarkan Tabel 4-3, komposisi kimia bitumen Asbuton dari kedua daerah deposit memiliki senyawa *Nitrogen base* yang tinggi dan parameter malten baik. Hal ini mengindikasikan Asbuton memiliki pelekatan yang baik dengan agregat dan keawetan yang cukup. Namun dilihat dari karakteristik lainnya Asbuton dari deposit Lawele mempunyai sifat aspal yang lebih lunak dibandingkan dengan Asbuton dari deposit Kabungka.

4.3. Spesifikasi Asbuton dan Campuran Beraspal Hangat Asbuton

Sesuai Surat Edaran Menteri Pekerjaan Umum No. 10/SE/M/2013, bahwa campuran beraspal asbuton dapat dilaksanakan dengan metoda campuran panas atau hangat adalah asbuton bentuk olahan (asbuton butir) yang dibagi menjadi 3 kelas atau tipe. Jenis asbuton butir yang dapat digunakan untuk campuran beraspal tersebut adalah:

- Tipe 5/20
- Tipe 30/25
- Tipe 50/30

Ketentuan karakteristik untuk ke tiga jenis asbuton butir tersebut disajikan pada Tabel 4.4.

Tabel 4-4. Karakteristik asbuton butir

| Sifat-sifat Asbuton Butir | Tipe B5/20 | Tipe B30/25 | Tipe B50/30 |
|---|------------|-------------|-------------|
| Sifat Bentuk Asli | | | |
| - Ukuran butir asbuton butir | | | |
| ✓ Lolos Ayakan 3/8 inci (9,5 mm); % | | | 100 |
| ✓ Lolos Ayakan No 4 (4,75 mm); % | | 100 | |
| ✓ Lolos Ayakan No 8 (2,36 mm); % | 100 | | |
| - Kadar air; % | Mak 2 | Mak 2 | Mak 2 |
| - Kadar bitumen asbuton; % | 18--22 | 23--27 | 25--30 |
| - Kelarutan dalam TCE; % berat | Min 99 | Min 99 | Min 99 |
| - Penetrasi aspal asbuton pada 25 °C, 100 g, 5 detik; 0,1 mm | ≤15 | 25--35 | 40--60 |
| - Titik Lembek; °C | - | - | Min 55 |
| - Daktilitas pada 25°C; cm | - | - | ≥ 100 |
| - Berat jenis | - | - | Min 1,0 |
| - Titik Nyala; °C | - | - | Min 232 |
| - Penurunan Berat (dengan TFOT); LOH (%) | - | ≤ 3 | ≤ 3 |
| - Penetrasi aspal asbuton setelah LOH pada 25 °C, 100 g, 5 detik; % terhadap penetrasi awal | - | ≥ 54 | ≥ 54 |

Untuk tujuan pengembangan teknologi aditif (peremaja hangat) untuk campuran beraspal hangat asbuton, bahan acuan untuk pengujian adalah:

- Sifat agregat dan aspal keras yang digunakan mengacu Spesifikasi Umum Bidang Jalan dan Jembatan Tahun 2010 Revisi-3 (Direktorat Jenderal Bina Marga, 2014).
- Gradasi agregat untuk campuran beraspal hangat dengan asbuton mengacu Spesifikasi Umum Bidang Jalan dan Jembatan Tahun 2010 Revisi-3 (Direktorat Jenderal Bina Marga, 2014), lihat Tabel 4-5.
- Ketentuan peremaja campuran beraspal hangat dengan asbuton mengacu Tabel 4-6 (Surat Edaran Menteri Pekerjaan Umum No. 10/SE/M/2013 tentang Pedoman Spesifikasi Teknis Campuran Beraspal Dengan Asbuton).
- Ketentuan campuran beraspal hangat dengan asbuton mengacu Tabel 4-7 (Surat Edaran Menteri Pekerjaan Umum No. 10/SE/M/2013 tentang Pedoman Spesifikasi Teknis Campuran Beraspal Dengan Asbuton).

- Persiapan benda uji untuk pengujian Marshall mengacu pada ASTM D6926-10 dan pengujian parameter Marshall sesuai SNI 2489:2014.

Tabel 4-5. Ketentuan gradasi agregat campuran beraspal hangat asbuton

| Ukuran ayakan | Persen berat lolos terhadap total agregat dalam campuran beraspal hangat asbuton | | |
|--------------------|--|---------|---------|
| | WMA-Asb | | |
| | WC | BC | Base |
| 1 ½ in (37,5 mm) | | | 100 |
| 1 in (25 mm) | | 100 | 90--100 |
| ¾ in (19 mm) | 100 | 90--100 | 76--90 |
| ½ in (12,5 mm) | 90--100 | 75--90 | 60--78 |
| 3/8 in (9,5 mm) | 77--90 | 66--82 | 52--71 |
| No. 4 (4,75 mm) | 53--69 | 46--64 | 35--54 |
| No. 8 (2,36 mm) | 33--53 | 30--49 | 23--41 |
| No. 16 (1,18 mm) | 21--40 | 18--38 | 14--30 |
| No. 30 (0,6 mm) | 14--30 | 12--28 | 10--22 |
| No. 50 (0,3 mm) | 9--22 | 7--20 | 6--15 |
| No. 100 (0,15 mm) | 6--15 | 5--13 | 4--10 |
| No. 200 (0,075 mm) | 4--10 | 4--8 | 3--7 |

Tabel 4-6. Ketentuan peremaja campuran beraspal hangat asbuton

| No. | Jenis Pengujian | Metode Pengujian | Persyaratan PH-1000 |
|-----|---|------------------|---------------------|
| 1. | Viskositas: - pada 60 °C; cSt | SNI 03-6721-2002 | 1000--1500 |
| 2. | Kelarutan dalam TCE; % | RSNI M-04-2004 | Min. 99,5 |
| 3. | Titik nyala; °C | SNI 2433:2011 | Min. 180 |
| 4. | Berat Jenis | SNI 2441:2011 | Min. 0,95 |
| 5. | Penurunan berat (TFOT); % terhadap berat awal | SNI 06-2440-1991 | Maks. 4 |
| 6 | Kadar parafin lilin; % | SNI 03-3639-2002 | Maks. 2 |

Tabel 4-7. Ketentuan campuran beraspal hangat dengan Asbuton

| Sifat – sifat campuran | | Campuran beraspal hangat dengan asbuton butir (WMA-Asb) | | |
|---|-------|---|----|---------------------|
| | | WC | BC | Base ⁽¹⁾ |
| Jumlah tumbukan per bidang | | 75 | | 112 |
| Rasio bahan pengisi terhadap aspal | | 0,6--1,6 | | |
| Rongga dalam campuran (VIM); % | Min. | 3 | | |
| | Maks. | 5 | | |
| Rongga dalam Agregat (VMA); % | Min. | 15 | 14 | 13 |
| Rongga terisi aspal; % | Min. | 65 | 63 | 60 |
| Stabilitas marshall; kg | Min. | 700 | | 1500 |
| Pelelehan; mm | Min. | 2 | | 3,5 |
| | Maks. | 4,5 | | 5,5 |
| Rongga dalam campuran pada kepadatan membal ⁽²⁾ ; % | Min. | 2,0 | | |
| Stabilitas Sisa setelah perendaman selama 24 jam, 60°C; % | Min | 90 | | |
| CATATAN: | | | | |
| (1) Modifikasi Marshall sesuai ASTM D 5581-07a (diameter benda uji 15 cm) | | | | |
| (2) Untuk menenentukan kepadatan membal (refusal), disarankan menggunakan penumbuk bergetar (<i>vibratory hammer</i>) agar pecahnya butiran agregat dalam campuran dapat dihindari. | | | | |

5. SIFAT CAMPURAN BERASPAL PANAS DENGAN RAP HASIL KAJIAN SEKALA LABORATORIUM

5.1. Sifat Bahan

5.1.1. Sifat RAP

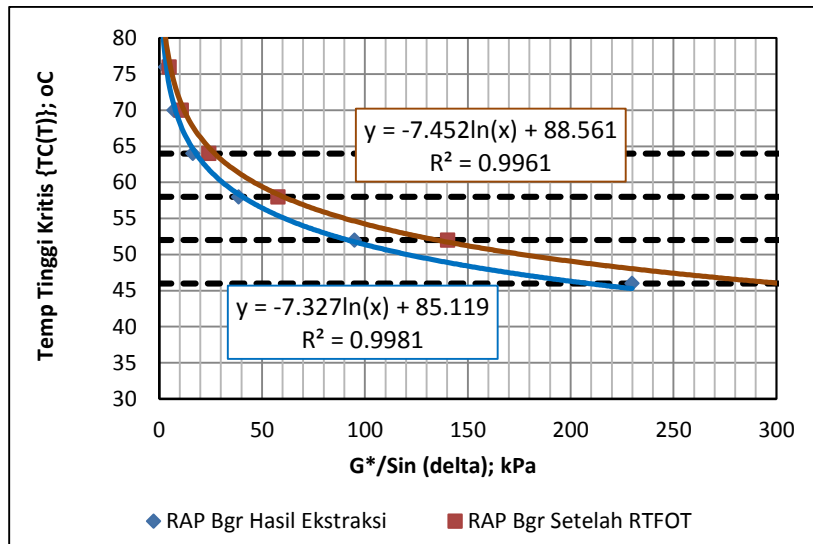
RAP yang diambil untuk kegiatan kajian adalah yang bersumber dari Bogor dan dari Cikampek. Sifat fisik RAP dari kedua lokasi tersebut disajikan pada Tabel 5-1. Adapun hasil pengujian DSR aspal RAP hasil pemulihan dan hasil penuaan dengan *Rolling Thin-Film Oven* (RTFO) terhadap Cikampek dan RAP Bogor masing-masing disajikan pada Tabel 5-2 dan Gambar 5-1 serta Gambar 5-2.

Tabel 5-1. Sifat RAP dari Bogor dan Cikampek

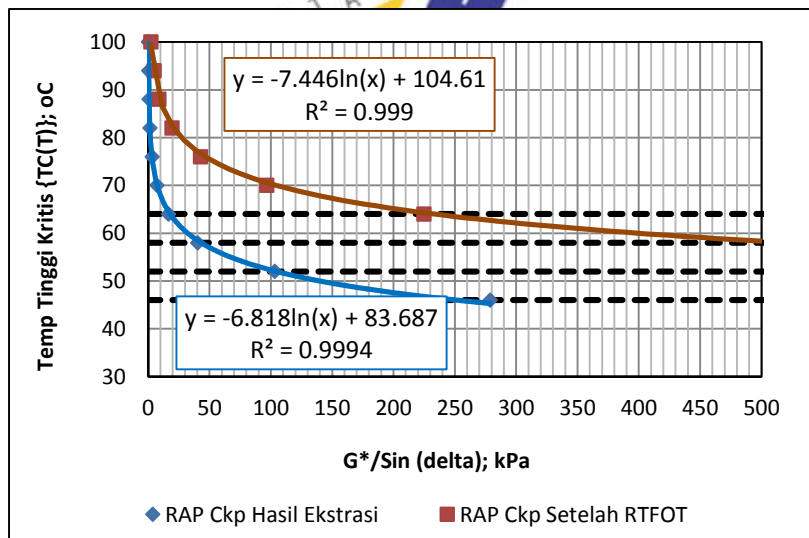
| No | Jenis Pengujian | Metode Pengujian | Hasil Pengujian | | | |
|----|---|------------------|---|--|---|--|
| | | | RAP Bogor | | RAP Cikampek | |
| | | | Asli Dari Lapangan | Hasil Ekstraksi | Asli Dari Lapangan | Hasil Ekstraksi |
| 1 | Analisa saringan; % berat lolos 1" 3/4" 1/2" 3/8" No. 4 No. 8 No. 16 No. 30 No. 50 No. 100 No. 200 | SNI 03-6822-2002 | 100,00 85,63 74,77 68,47 51,17 35,49 22,14 12,62 6,00 2,52 0,65 | 100 98,09 95,13 80,92 59,96 44,19 33,94 25,91 19,85 13,95 | 100,00 95,83 85,95 74,07 66,65 47,02 30,48 10,01 4,65 1,96 0,48 | 100 99,63 98,22 92,05 77,30 59,78 44,90 32,70 24,74 18,35 |
| 2 | Kadar aspal; % | SNI 03-3640-1994 | | 5,93 | | 5,48 |
| 3 | Kadar air; % | SNI-2490-2008 | | 1,86 | | 1,06 |
| 4 | Penetrasi; dmm | SNI 2456 : 2011 | | 22 | | 10 |
| 5 | Titik lembek; °C | SNI 2434 : 2011 | | 66 | | 76,8 |
| 6 | Daktilitas; cm | SNI 2432 : 2011 | | 11,8 | | 4,2 |
| 7 | Berat jenis | SNI 2441 : 2011 | | 1,0584 | | 1,0891 |
| 8 | Titik nyala; °C | SNI 2433 : 2011 | | 246 | | 260 |
| 9 | Viskositas absolut pada 60°C; Pa.s | SNI 03-6440-2000 | | - | | 3781,9 |
| 10 | Viskositas kinematis pada 135°C; cSt | SNI 7729:2011 | | 1108,7 | | 2874,8 |
| 11 | Viskositas absolut pada 60°C setelah TFOT; Pa.s | SNI 03-6440-2000 | | - | | - |

Tabel 5-2. Hubungan temperatur dengan $G^*/\sin(\delta)$ untuk RAP dari Bogor dan Cikampek

| Temperatur; °C | $G^*/\sin(\delta)$; kPa | | | |
|----------------|--------------------------|---------------|-----------------|---------------|
| | RAP Bogor | | RAP Cikampek | |
| | Hasil Ekstraksi | Setelah RTFOT | Hasil Ekstraksi | Setelah RTFOT |
| 46 | 229,80 | 340,30 | 278,70 | 2813,00 |
| 52 | 94,97 | 140,30 | 103,20 | 1235,00 |
| 58 | 38,68 | 57,85 | 40,24 | 526,70 |
| 64 | 16,48 | 24,26 | 16,54 | 224,70 |
| 70 | 7,19 | 10,84 | 7,03 | 96,69 |
| 76 | 3,24 | 4,93 | 3,16 | 42,51 |
| 82 | 1,55 | 2,30 | 1,43 | 19,30 |
| 88 | 0,78 | 1,37 | 0,53 | 8,81 |
| 94 | | | 0,22 | 4,65 |
| 100 | | | 0,09 | 2,03 |



Gambar 5-1. Hubungan temperatur tinggi kritis RAP Bogor dengan $G^*/\sin(\delta)$



Gambar 5-2. Hubungan temperatur tinggi kritis RAP Cikampek dengan $G^*/\sin(\delta)$

Pada Tabel 5-1, kedua RAP tersebut mengalami perubahan gradasi setelah dilakukan ekstraksi. Tingkat kekerasan aspal RAP Cikampek lebih tinggi dari pada yang dari Bogor, yaitu dicerminkan oleh nilai penetrasi RAP Cikampek hanya 10 dmm. Hal demikian sejalan

dengan nilai viskositasnya, yaitu viskositas aspal RAP Cikampek lebih dari dua kali lipat viscositas aspal RAP Bogor.

Berdasarkan hasil pengujian DSR pada aspal RAP hasil pemulihan serta hasil penuaan dengan RTFO untuk kedua sumber RAP (Bogor dan Cikampek) maka dengan menggunakan Persamaan 1 sampai dengan Persamaan 4 diperoleh temperatur tinggi kritis $\{T_{C(T)}\}$. Selain itu dengan menggunakan Persamaan 5 dan Persamaan 6 diperoleh juga temperatur menengah kritis $\{T_{C(M)}\}$ untuk aspal RAP hasil penuaan dengan RTFO dari kedua sumber. Data tempertaur tinggi kritis $\{T_{C(T)}\}$ dan temperatur menengah kritis $\{T_{C(M)}\}$ untuk aspal RAP dari kedua sumber disajikan pada Tabel 5-3. Pada Tabel 5-3 terlihat bahwa aspal RAP Bogor memiliki temperatur tinggi kritis $\{T_{C(T)}\}$ sebesar 82,53 °C (nilai terendah dari hasil DSR aspal hasil pemulihan dan DSR aspal setelah RTFO) dan dan temperatur menengah kritis $\{T_{C(M)}\}$ sebesar 82,53 °C. Adapun untuk aspal RAP Cikampek memiliki temperatur tinggi kritis $\{T_{C(T)}\}$ dan temperatur menengah kritis $\{T_{C(M)}\}$ sebesar 84,16 °C. Berdasarkan temperatur kritis tinggi dan menengah maka untuk kedua aspal RAP masuk PG 82(28).

Untuk keperluan kajian lebih lanjut maka digunakan RAP Bogor karena RAP Cikampek dipandang terlalu keras sehingga kemungkinan kurang efektif dalam pemanfaatannya.

Tabel 5-3. Temp tinggi kritis $\{T_{C(T)}\}$ dan temp menengah kritis $\{T_{C(M)}\}$ untuk RAP dari Bogor dan Cikampek

| Karakteristik RAP | Temperatur Kritis (Tc); °C | |
|---|----------------------------|--------------|
| Temperatur Tinggi Kritis $\{T_{C(T)}\}$: | RAP Bogor | RAP Cikampek |
| - Hasil Ekstraksi | 85,82 | 99,42 |
| - Setelah RTFOT | 82,53 | 84,16 |
| Temperatur Menengah Kritis $\{T_{C(M)}\}$ Setelah RTFOT: | 82,53 | 84,16 |

5.1.2. Sifat Agregat

Agregat yang digunakan untuk bahan campuran beraspal panas maupun camuran beraspal hangat adalah agregat yang bersumber dari Jawa Barat. Adapun data sifat fisik agregat seperti disajikan pada Tabel 5-4.

Tabel 5-4. Sifat agregat

| No | Jenis pengujian | Jenis pengujian | | |
|----|-------------------------------|-----------------|----------------|---------------|
| | | Agregat Kasar | Agregat Sedang | Agregat Halus |
| 1 | Abrasi; % | 17,75 | - | - |
| 2 | Setara Pasir | - | - | 60,75 |
| 3 | Berat jenis | - | - | - |
| | <i>bulk</i> | 2,677 | 2,629 | 2,606 |
| | <i>SSD</i> | 2,704 | 2,677 | 2,658 |
| | <i>apparent</i> | 2,763 | 2,762 | 2,750 |
| 4 | Penyerapan; % | 0,977 | 1,832 | 2,010 |
| 5 | Angularitas Halus; % | - | - | 59,64 |
| 6 | Angularitas Kasar; % | 100 | 100 | - |
| 7 | Kelekatan; % | - | > 95 | - |
| 8 | Partikel Pipih dan lonjong; % | 10 | - | - |

Tabel 5-4. Sifat agregat (lanjutan)

| No | Jenis pengujian | Jenis pengujian | | |
|----|---------------------------------|-----------------|----------------|---------------|
| | | Agregat Kasar | Agregat Sedang | Agregat Halus |
| 9 | Analisa saringan; % berat lolos | - | - | - |
| | 1" | 100 | - | - |
| | 3/4" | 99,68 | 100 | - |
| | 1/2" | 13,33 | 99,86 | - |
| | 3/8" | 4,05 | 94,27 | 100 |
| | No. 4 | 1,89 | 18,33 | 98,98 |
| | No. 8 | 1,51 | 4,27 | 68,87 |
| | No. 16 | 1,37 | 3,31 | 39,58 |
| | No. 30 | 1,29 | 2,69 | 25,85 |
| | No. 50 | 1,18 | 2,20 | 18,06 |
| | No. 100 | 1,00 | 1,78 | 13,64 |
| | No. 200 | 0,68 | 1,33 | 9,86 |

5.1.3. Sifat Bahan Pengikat

Bahan pengikat untuk campuran beraspal panas, baik yang menggunakan RAP sebanyak 10% maupun yang tanpa RAP, adalah aspal keras Pen 60-70. Sedangkan untuk campuran beraspal panas

dengan menggunakan RAP > 10% menggunakan aspal Pen 60-70 yang dicampur dengan bahan pelunak/peremaja (*rejuvenator*). Selain itu, aspal Pen 60-70 digunakan untuk pembuatan Peremaja Hangat (PH) untuk campuran asbuton hangat. Sifat fisik aspal Pen 60-70 seperti disajikan pada Tabel 5-5. Berdasarkan hasil pengujian diperoleh bahwa aspal Pen 60-70 memenuhi persyaratan.

5.1.4. Sifat Bahan Peremaja (*Rejuvenator*)

Seperti diketahui untuk penggunaan RAP dalam campuran beraspal panas sesuai Butir 3-2, terutama penggunaan RAP dengan proporsi tinggi (>25%) harus menggunakan aspal PG rendah (aspal yang lunak). Untuk membuat aspal PG rendah tersebut pada kajian ini dicoba dengan membuat/menyediakan 4 jenis bahan pelunak atau peremaja seperti disajikan pada Tabel 5-6 dan Gambar 5-3. Dari ke empat jenis peremaja tersebut, dua jenis peremaja merupakan terdapat langsung dari pasaran, yaitu minyak nabati/goreng curah (MG) dan Oli SAE 10 curah. Sedangkan untuk yang 2 peremaja lagi merupakan campuran dari beberapa bahan dengan proporsi tertentu untuk masing-masing bahannya.

Pada Tabel 5-6 terlihat sifat fisik ke 4 bahan peremaja memiliki viskositas, titik nyala dan berat jenis bervariasi. Viskositas MG dan Oli lebih rendah (encer) daripada 2 peremaja lain yang disediakan.

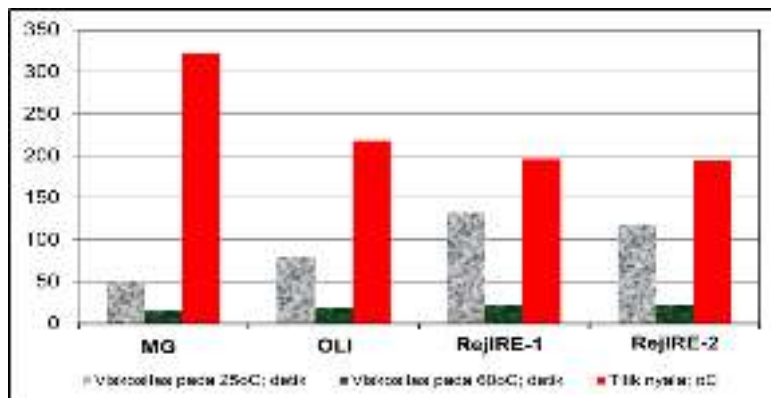
Tabel 5-5. Sifat Aspal Pen 60-70

| No. | Jenis Pengujian | Hasil Pengujian | Spesifikasi* |
|-----|---|-----------------|--------------|
| 1. | Penetrasi pada 25 °C, 100 g, 5 detik; 0,1 mm | 66 | 60 - 70 |
| 2. | Viskositas pada 60°C; Pa.s | 211,1 | 160-240 |
| 3. | Viskositas pada 135°C; cSt | 380,4 | ≥ 300 |
| 4. | Titik lembek; °C | 48,4 | ≥ 48 |
| 5. | Daktilitas pada 25 °C, 5 cm / menit; cm | >140 | ≥ 100 |
| 6. | Titik nyala (COC); °C | 287 | ≥ 232 |
| 7. | Kelarutan dalam C ₂ HCl ₃ ; % | 99,8323 | ≥ 99 |
| 8. | Berat jenis | 1,039 | ≥ 1,0 |
| 9. | Kehilangan berat (TFOT); % | 0,0376 | ≤ 0,8 |
| 10. | Penetrasi setelah TFOT; % | 80,6 | ≥ 54 |
| 11. | Daktilitas setelah TFOT; cm | >140 | ≥ 100 |
| 12. | Viskositas pada 60°C setelah TFOT; Pa.s | 233,6 | ≤ 800 |
| 13. | Temperatur pencampuran; °C | 150-156 | - |
| 14. | Temperatur pencampuran; °C | 135-145 | - |

Keterangan: * Direktorat Jenderal Bina Marga (2014)

Tabel 5-6. Sifat bahan peremaja

| No. | Jenis Pengujian | Metode Pengujian | Hasil Pengujian | | | |
|-----|---------------------------|------------------|-----------------|--------|----------|----------|
| | | | MG | OLI | RejIRE-1 | RejIRE-2 |
| 1. | Viskositas pada 25°C; cSt | SNI 7729 : 2011 | 103 | 165 | 276 | 245 |
| | Viskositas pada 60°C; cSt | SNI 7729 : 2011 | 28,6 | 34,9 | 39,1 | 42,2 |
| 2. | Titik nyala; °C | SNI 2433 : 2011 | 322 | 218 | 196 | 194 |
| 3. | Berat jenis | SNI 2441 : 2011 | 0,9208 | 0,8740 | 0,9956 | 0,9781 |



Gambar 5-3. Viskositas dan titik nyala keempat peremaja

5.1.5. Sifat Aspal Pen 60 Setelah Ditambah Variasi Bahan Peremaja

Pembuatan sampel campuran antara aspal Pen 60 dengan variasi bahan peremaja dilakukan dengan menggunakan alat pencampur khusus. Proses pencampuran aspal Pen 60 dipanaskan sampai dengan 130 °C kemudian dimasukkan bahan peremaja kemudian diaduk selama 10 menit dengan kecepatan 4000 rpm.

Sifat campuran antara aspal Pen 60 dengan variasi proporsi MG, dengan variasi proporsi OLI, dengan variasi proporsi RejIRE1, dan dengan variasi proporsi RejIRE2, berturut-turut disajikan pada Tabel 5-7 sampai dengan Tabel 5-10.

Selain itu untuk gambaran perubahan sifat aspal Pen 60-70 setelah dicampur masing-masing peremaja dengan variasi proporsi disajikan juga pada Gambar 5-4, 5-5 dan 5-6.

Tabel 5-7. Sifat bahan pengikat Aspal Pen 60 ditambah variasi MG

| No. | Jenis Pengujian | Metode Pengujian | Hasil Pengujian | | |
|-----|---|------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|
| | | | 2% MG : 98% Pen 60-70 | 4% MG : 96% Pen 60-70 | 6% MG : 94% Pen 60-70 |
| 1. | Penetrasi pada 25 °C, 100 g, 5 detik; 0,1 mm | SNI 2456 : 2011 | 104 | 141 | 195 |
| 2. | Viskositas absolut pada 60°C; Pa.s | SNI 03-6440-2000 | 75,9 | 68,9 | 40,1 |
| 3. | Viskositas pada 135°C; cSt | SNI 7729 : 2011 | 305 | 250 | 215 |
| 4. | Titik lembek; °C | SNI 2434 : 2011 | 44,7 | 41,1 | 38,5 |
| 5. | Daktilitas pada 25 °C, 5 cm/menit; cm | SNI 2432 : 2011 | >140 | >140 | >140 |
| 6. | Titik nyala (COC); °C | SNI 2433 : 2011 | 339 | 337 | 333 |
| 7. | Kelarutan dalam C ₂ HCl ₃ ; % | SNI 06-2438-1991 | 99,8512 | 99,8275 | 99,8162 |
| 8. | Berat jenis | SNI 2441 : 2011 | 1,0371 | 1,0342 | 1,0304 |
| 9. | Kehilangan berat (TFOT); % | SNI 06-2440-1991 | 0,0334 | 0,0461 | 0,0579 |
| 10. | Penetrasi setelah TFOT; % | SNI 2456 : 2011 | 76,0 | 76,2 | 84,6 |
| 11. | Daktilitas setelah TFOT; cm | SNI 2432 : 2011 | >140 | >140 | >140 |
| 12. | Perkiraan suhu pencampuran; °C | AASHTO-72-1997 | 146-152 | 142 – 148 | 139 – 145 |
| 13. | Perkiraan suhu pemadatan; °C | AASHTO-72-1997 | 134-139 | 130 – 135 | 128 – 133 |

Tabel 5-8. Sifat bahan pengikat Aspal Pen 60 ditambah variasi OLI

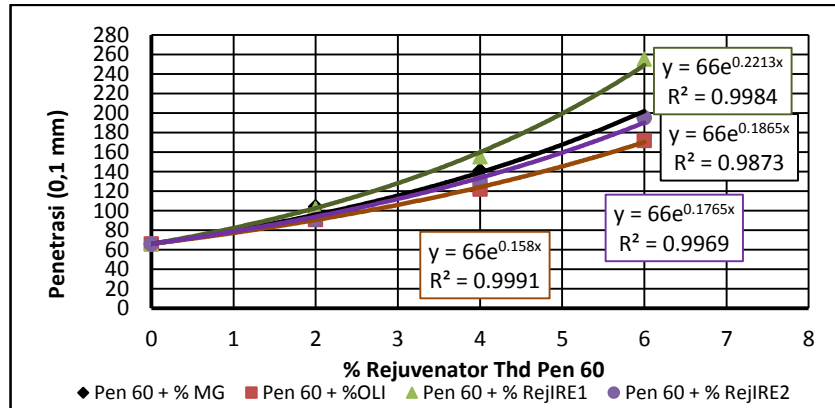
| No. | Jenis Pengujian | Metode Pengujian | Hasil Pengujian | | |
|-----|---|------------------|------------------------|------------------------|------------------------|
| | | | 2% Oli : 98% Pen 60-70 | 4% Oli : 96% Pen 60-70 | 6% Oli : 94% Pen 60-70 |
| 1. | Penetrasi pada 25 °C, 100 g, 5 detik; 0,1 mm | SNI 2456 : 2011 | 91 | 122 | 172 |
| 2. | Viskositas absolut pada 60°C; Pa.s | SNI 03-6440-2000 | 107 | 93,5 | 72,6 |
| 3. | Viskositas pada 135°C; cSt | SNI 7729 : 2011 | 350 | 300 | 255 |
| 4. | Titik lembek; °C | SNI 2434 : 2011 | 46,0 | 44,0 | 41,0 |
| 5. | Daktilitas pada 25 °C, 5 cm/menit; cm | SNI 2432 : 2011 | >140 | >140 | >140 |
| 6. | Titik nyala (COC); °C | SNI 2433 : 2011 | 326 | 315 | 302 |
| 7. | Kelarutan dalam C ₂ HCl ₃ ; % | SNI 06-2438-1991 | 99,8661 | 99,8535 | 99,8183 |
| 8. | Berat jenis | SNI 2441 : 2011 | 1,0354 | 1,0307 | 1,0267 |
| 9. | Kehilangan berat (TFOT); % | SNI 06-2440-1991 | 0,0069 | 0,0563 | 0,0946 |
| 10. | Penetrasi setelah TFOT; % | SNI 2456 : 2011 | 79,1 | 63,9 | 64,5 |
| 11. | Daktilitas setelah TFOT; cm | SNI 2432 : 2011 | >140 | >140 | >140 |
| 12. | Perkiraan suhu pencampuran; °C | AASHTO-72-1997 | 147 – 153 | 146 – 152 | 141 – 147 |
| 13. | Perkiraan suhu pemadatan; °C | AASHTO-72-1997 | 134 – 140 | 134 – 140 | 129 – 134 |

Tabel 5-9. Sifat bahan pengikat Aspal Pen 60 ditambah variasi RejIRE1

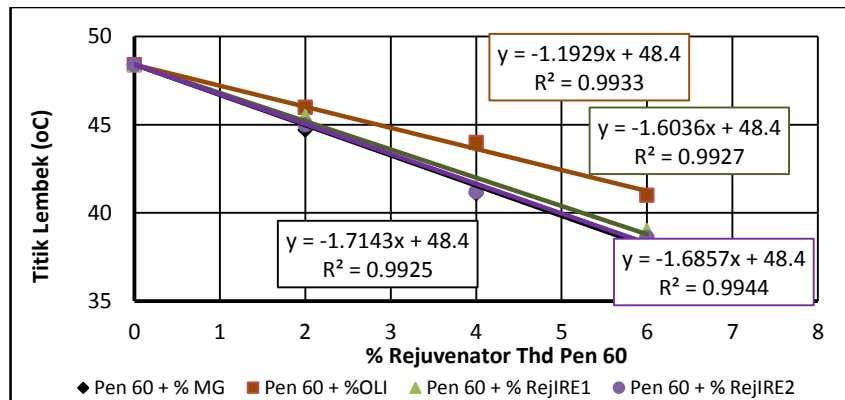
| No. | Jenis Pengujian | Metode Pengujian | Hasil Pengujian | | |
|-----|---|------------------|----------------------------------|--------------------------------|----------------------------------|
| | | | 2% RejuvIRE-1 : 98% Pen 60-70 | 4% RejIRE-1 : 96% Pen 60-70 | 6% RejuvIRE-1 : 94% Pen 60-70 |
| 1. | Penetrasi pada 25 °C, 100 g, 5 detik; 0,1 mm | SNI 2456 : 2011 | 102 | 155 | 255 |
| 2. | Viskositas absolut pada 60°C; Pa.s | SNI 03-6440-2000 | 89,5 | 75,3 | 59,9 |
| 3. | Viskositas pada 135°C; cSt | SNI 7729 : 2011 | 330 | 275 | 225 |
| 4. | Titik lembek; °C | SNI 2434 : 2011 | 45,5 | 41,5 | 39,0 |
| 5. | Daktilitas pada 25 °C, 5 cm/menit; cm | SNI 2432 : 2011 | >140 | >140 | >140 |
| 6. | Titik nyala (COC); °C | SNI 2433 : 2011 | 325 | 323 | 307 |
| 7. | Kelarutan dalam C ₂ HCl ₃ ; % | SNI 06-2438-1991 | 99,8675 | 99,8008 | 99,7762 |
| 8. | Berat jenis | SNI 2441 : 2011 | 1,0394 | 1,0378 | 1,0368 |
| 9. | Kehilangan berat (TFOT); % | SNI 06-2440-1991 | 0,0093 | 0,0401 | 0,0425 |
| 10. | Penetrasi setelah TFOT; % | SNI 2456 : 2011 | 74,5 | 71,6 | 60 |
| 11. | Daktilitas setelah TFOT; cm | SNI 2432 : 2011 | >140 | >140 | >140 |
| 12. | Perkiraan suhu pencampuran; °C | AASHTO-72-1997 | 148-153 | 141 – 147 | 139 – 144 |
| 13. | Perkiraan suhu pemadatan; °C | AASHTO-72-1997 | 137-142 | 131 – 135 | 127 – 132 |

Tabel 5-10. Sifat bahan pengikat Aspal Pen 60 ditambah variasi RejIRE2

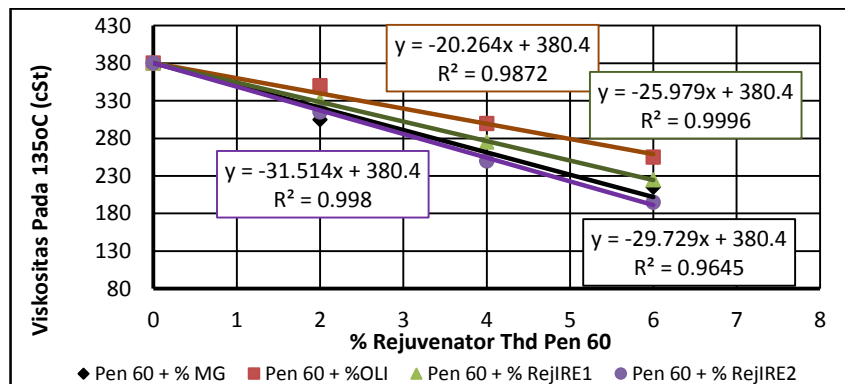
| No. | Jenis Pengujian | Metode Pengujian | Hasil Pengujian | | |
|-----|---|------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|
| | | | 2% RejIRE-2 : 98% Pen 60-70 | 4% RejIRE-2 : 96% Pen 60-70 | 6% RejIRE-2 : 94% Pen 60-70 |
| 1. | Penetrasi pada 25 °C, 100 g, 5 detik; 0,1 mm | SNI 2456 : 2011 | 91 | 131 | 195 |
| 2. | Viskositas absolut pada 60°C; Pa.s | SNI 03-6440-2000 | 146,5 | 95,8 | 57,5 |
| 3. | Viskositas pada 135°C; cSt | SNI 7729 : 2011 | 315 | 250 | 195 |
| 4. | Titik lembek; °C | SNI 2434 : 2011 | 45,0 | 41,2 | 38,6 |
| 5. | Daktilitas pada 25 °C, 5 cm/menit; cm | SNI 2432 : 2011 | >140 | >140 | >140 |
| 6. | Titik nyala (COC); °C | SNI 2433 : 2011 | 322 | 314 | 300 |
| 7. | Kelarutan dalam C ₂ HCl ₃ ; % | SNI 06-2438-1991 | 99,8845 | 99,6334 | 99,3787 |
| 8. | Berat jenis | SNI 2441 : 2011 | 1,0388 | 1,0368 | 1,0354 |
| 9. | Kehilangan berat (TFOT); % | SNI 06-2440-1991 | 0,0806 | 0,1813 | 0,3358 |
| 10. | Penetrasi setelah TFOT; % | SNI 2456 : 2011 | 75,8 | 79,4 | 75,4 |
| 11. | Daktilitas setelah TFOT; cm | SNI 2432 : 2011 | >140 | >140 | >140 |
| 12. | Perkiraan suhu pencampuran; °C | AASHTO-72-1997 | 149 – 155 | 142 – 148 | 136 – 141 |
| 13. | Perkiraan suhu pemadatan; °C | AASHTO-72-1997 | 136 – 141 | 130 – 135 | 125 – 129 |



Gambar 5-4. Hubungan antara nilai penetrasi dengan penambahan variasi *rejuvenator*



Gambar 5-5. Hubungan antara nilai titik lembek dengan penambahan variasi *rejuvenator*



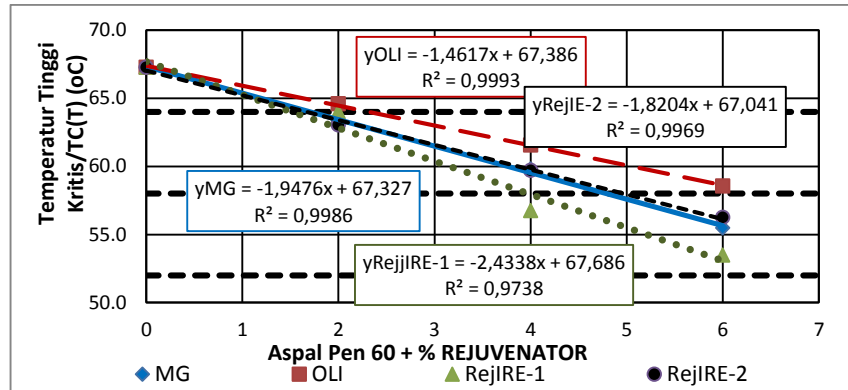
Gambar 5-6. Hubungan antara nilai nilai viskositas dengan penambahan variasi *rejuvenator*

Pada Tabel 5-7 sampai dengan Tabel 5-10 serta pada Gambar 5-4 sampai dengan Gambar 5-6, terlihat bahwa makin banyak penambahan bahan peremaja menaikkan nilai penetrasi dan menurunkan nilai titik lembek serta menurunkan nilai viskositas. Penambahan peremaja RejIRE1 pada aspal Pen 60-70 menaikkan nilai penetrasi yang paling tinggi dibandingkan dengan ketiga peremaja lainnya. Bila memperhatikan perubahan nilai titik lembek maka untuk ketiga peremaja mengalami penurunan yang relatif sama kecuali yang penambahan dengan Oli penurunan nilai titik lembeknya lebih rendah. Begitu juga untuk nilai viskositas kecenderungan penurunan hampir sama.

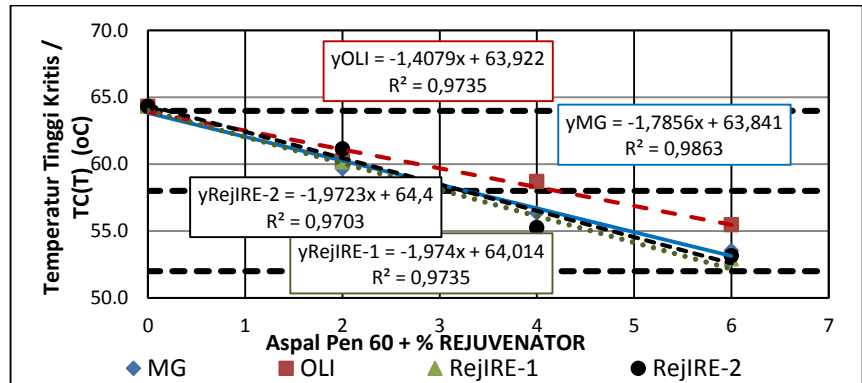
Berdasarkan hasil pengujian DSR pada contoh aspal Pen 60-70 yang telah dicampur dengan masing-masing peremaja dengan proporsi yang sama, seperti disajikan pada Gambar 5-7 (temperatur tinggi kritis benda uji *fresh*) dan Gambar 5-8 (temperatur tinggi kritis benda uji setelah RTFO).

Pada Gambar 5-7 dan Gambar 5-8 terlihat bahwa untuk keempat peremaja mengalami penurunan nilai temperatur tinggi kritis $\{T_{C(T)}\}$ dari benda uji *fresh* dengan benda uji setelah RTFO. Dari ketiga peremaja yang mengalami penurunan $T_{C(T)}$ relatif kecil, kecuali yang RejIRE1. Berdasarkan data tersebut kemungkinan penggunaan RejIRE1 relatif lebih sedikit untuk membuat aspal baru yang akan digunakan pada campuran beraspal panas menggunakan RAP yang proporsinya tinggi (25%).

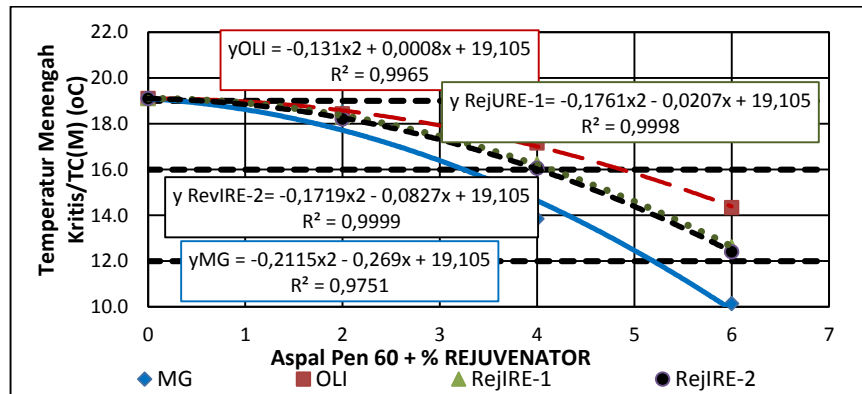
Pada Gambar 5-9 terlihat bahwa membandingkan keempat peremaja memiliki nilai temperatur menengah kritis $\{T_{C(M)}\}$ yaitu benda uji setelah PAV, untuk MG mengalami perubahan menjadi paling terendah. Sedangkan untuk Rejuv OLI, RejIRE1 dan RejIRE2 kecenderungan sama seperti pada temperatur tinggi kritis $\{T_{C(T)}\}$. Berdasarkan Gambar 5-9 maka penggunaan peremaja MG lebih sedikit dibandingkan dengan ketiga peremaja lainnya.



Gambar 5-7. Hubungan antara temperatur tinggi kritis benda uji fresh dengan penambahan variasi *rejuvenator*



Gambar 5-8. Hubungan antara temperatur tinggi kritis benda uji setelah RTFOT dengan penambahan variasi *rejuvenator*



Gambar 5-9. Hubungan antara temperatur menengah kritis benda uji setelah PAV dengan penambahan variasi *rejuvenator*

5.1.6. Penggunaan RAP dalam Campuran Beraspal Panas dan Bahan Peremaja

Proporsi penggunaan RAP dapat ditentukan berdasarkan spesifikasi gradasi dan kelas bahan pengikat yang tersedia. Untuk itu, sesuai Butir 3-2. ada cara untuk penggunaan RAP, yaitu:

- Pencampuran pada persentase RAP yang telah diketahui
- Pencampuran dengan bahan pengikat baru yang diketahui

Bilamana bahan pengikat baru yang diketahui maka berdasarkan data DSR yang telah diperoleh, yaitu temperatur tinggi kritis $\{T_{C(T)}\}$, untuk RAP (contoh RAP Bogor = 82,53 °C), $T_{blend} (RAP + Asp Pen 60 + Rejuvenator)$ yang ditargetkan masuk PG 64(25) maka untuk variasi $T_{C(T)}$ $Asp Pen 60 + Rejuvenator$ yang tersedia diperoleh proporsi RAP (sesuai Persamaan 12) dan untuk menentukan komposisi aspal baru, yaitu perbandingan antara aspal Pen 60-70 dengan masing-masing bahan peremaja dapat menggunakan Gambar 5-7 (temperatur tinggi kritis, $T_{C(T)}$) dan Gambar 5-8 (temperatur menengah kritis, $T_{C(M)}$).

Proporsi RAP yang diijinkan dan komposisi aspal baru berdasarkan temperatur tinggi kritis $\{T_{C(T)}\}$ disajikan pada Tabel 5-11. Pada Tabel 5-11 proporsi penggunaan RAP Bogor yang diijinkan apabila menggunakan aspal baru dengan PG 58 adalah sebanyak 24,5%, untuk aspal baru PG 52 sebanyak 39,3% dan untuk aspal baru PG 46 sebanyak 49,3%. Proporsi RAP yang diijinkan dan komposisi aspal baru berdasarkan temperatur menengah kritis $\{T_{C(M)}\}$ disajikan pada Tabel 5-12. Bilamana $T_{blend} (RAP + Asp Pen 60 + Rejuvenator)$ pada temperatur menengah kritis $\{T_{C(M)}\}$ yang ditargetkan masuk PG 64 (25) maka pada Tabel 5-12 proporsi penggunaan RAP Bogor yang diijinkan apabila menggunakan aspal baru dengan PG 58(16) adalah sebanyak 13,5%, untuk aspal baru PG 52(10) sebanyak 20,7% dan untuk aspal baru PG 46(0) sebanyak 30,2%. Pada Tabel 5-12 juga diperoleh bahwa proporsi peremaja MG untuk pembuatan aspal baru lebih sedikit dibandingkan dengan yang lainnya.

Tabel 5-11. Proporsi RAP yang diijinkan dan komposisi aspal baru berdasarkan temperatur tinggi kritis $\{T_{C(T)}\}$

| | | | | | | |
|---------------------------|-------|---|-----------------|---------------------|-------|------------|
| Aspal Baru = PG 58 | | | | RAP = 24,5 % | | |
| Komposisi Aspal Baru : | | | | | | |
| - | 96,80 | % | Aspal Pen 60-70 | + | 3,20 | % MG |
| - | 95,80 | % | Aspal Pen 60-70 | + | 4,20 | % OLI |
| - | 97,00 | % | Aspal Pen 60-70 | + | 3,00 | % RejIRE-1 |
| - | 96,80 | % | Aspal Pen 60-70 | + | 3,20 | % RejIRE-2 |
| Aspal Baru = PG 52 | | | | RAP = 39,3 % | | |
| Komposisi Aspal Baru : | | | | | | |
| - | 93,40 | % | Aspal Pen 60-70 | + | 6,60 | % MG |
| - | 91,60 | % | Aspal Pen 60-70 | + | 8,40 | % OLI |
| - | 94,00 | % | Aspal Pen 60-70 | + | 6,00 | % RejIRE-1 |
| - | 93,80 | % | Aspal Pen 60-70 | + | 6,20 | % RejIRE-2 |
| Aspal Baru = PG 46 | | | | RAP = 53,7 % | | |
| Komposisi Aspal Baru : | | | | | | |
| - | 90,10 | % | Aspal Pen 60-70 | + | 9,90 | % MG |
| - | 87,30 | % | Aspal Pen 60-70 | + | 12,70 | % OLI |
| - | 90,90 | % | Aspal Pen 60-70 | + | 9,10 | % RejIRE-1 |
| - | 90,70 | % | Aspal Pen 60-70 | + | 9,30 | % RejIRE-2 |

Tabel 5-12. Proporsi RAP yang diijinkan dan komposisi aspal baru berdasarkan temperatur menengah kritis $\{T_{C(M)}\}$

| | | | | | | | |
|--------------------------------|-------|---|-----------------|---------------------|-------|---|----------|
| Aspal Baru = PG 58 (16) | | | | RAP = 13,5 % | | | |
| Komposisi Aspal Baru : | | | | | | | |
| - | 96,80 | % | Aspal Pen 60-70 | + | 3,20 | % | MG |
| - | 95,30 | % | Aspal Pen 60-70 | + | 4,70 | % | OLI |
| - | 96,00 | % | Aspal Pen 60-70 | + | 4,00 | % | RejIRE-1 |
| - | 96,10 | % | Aspal Pen 60-70 | + | 3,90 | % | RejIRE-2 |
| Aspal Baru = PG 52 (10) | | | | RAP = 20,6 % | | | |
| Komposisi Aspal Baru : | | | | | | | |
| - | 94,10 | % | Aspal Pen 60-70 | + | 5,90 | % | MG |
| - | 91,70 | % | Aspal Pen 60-70 | + | 8,30 | % | OLI |
| - | 92,90 | % | Aspal Pen 60-70 | + | 7,10 | % | RejIRE-1 |
| - | 93,00 | % | Aspal Pen 60-70 | + | 7,00 | % | RejIRE-2 |
| Aspal Baru = PG 46 (0) | | | | RAP = 30,3 % | | | |
| Komposisi Aspal Baru : | | | | | | | |
| - | 91,11 | % | Aspal Pen 60-70 | + | 8,89 | % | MG |
| - | 87,92 | % | Aspal Pen 60-70 | + | 12,08 | % | OLI |
| - | 89,65 | % | Aspal Pen 60-70 | + | 10,35 | % | RejIRE-1 |
| - | 89,70 | % | Aspal Pen 60-70 | + | 10,30 | % | RejIRE-2 |

Mengacu pada Tabel 5-11 dan Tabel 5-12 maka proporsi RAP yang menentukan adalah berdasarkan temperatur menengah kritis $\{T_{C(M)}\}$. Jadi untuk T_{blend} (RAP + Asp Pen 60 + *Rejuvenator*) yang ditargetkan masuk PG 64(25) bilamana aspal baru yang digunakan adalah:

- Aspal Baru PG 58 (16); RAP maksimum 13,5%
- Aspal Baru PG 52 (10); RAP maksimum 20,6%
- Aspal Baru PG 46 (0); RAP maksimum 30,3%

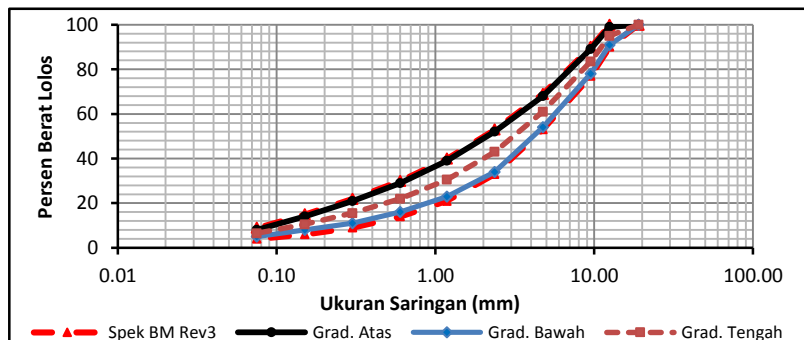
Pada Tabel 5-12 terlihat juga untuk penggunaan RAP >10% dengan penetrasi sekitar 22 dmm diperlukan aspal dengan *grade* yang lebih rendah atau aspal Pen 60-70 dimodifikasi dengan bahan peremaja tidak rentan terhadap retak leleh.

5.2. Gradasi Campuran Berapal Panas Rencana Dengan Atau Tanpa RAP

Gradasi agregat campuran untuk pembuatan campuran beraspal panas, baik dengan RAP maupun tanpa RAP adalah terdiri dari 3 gradasi, yaitu gradasi atas, tengah dan bawah, seperti disajikan pada Tabel 5-13 dan Gambar 5-10.

Tabel 5-13. Gradasi agregat campuran Laston

| Ukuran Saringan | | Gradasi Rencana (Pertase berat lolos) | | | Spesifikasi Gradasi (Pertase berat lolos) | |
|-----------------|-------|--|-------|--------|--|-------|
| ASTM | (mm) | Atas | Bawah | Tengah | Min. | Maks. |
| 3/4" | 19,00 | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 |
| 1/2" | 12,50 | 99,0 | 91,0 | 95,0 | 90 | 100 |
| 3/8" | 9,50 | 89,0 | 78,0 | 83,5 | 77 | 90 |
| #4 | 4,75 | 68,0 | 54,0 | 61,0 | 53 | 69 |
| #8 | 2,36 | 52,0 | 34,0 | 43,0 | 33 | 53 |
| #16 | 1,18 | 39,0 | 23,0 | 30,5 | 21 | 40 |
| #30 | 0,60 | 29,0 | 16,0 | 22,0 | 14 | 30 |
| #50 | 0,30 | 21,0 | 11,0 | 15,5 | 9 | 22 |
| #100 | 0,150 | 14,0 | 8,0 | 10,5 | 6 | 15 |
| #200 | 0,075 | 8,0 | 5,0 | 6,5 | 4 | 9 |



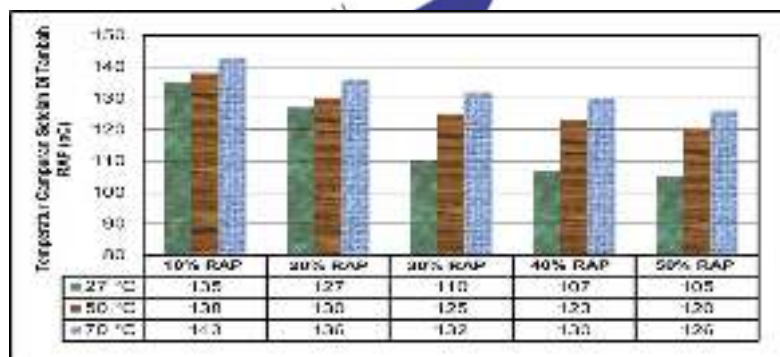
Gambar 5-10. Variasi gradasi campuran rencana

5.3. Sifat Campuran Beraspal Panas Rencana Dengan Atau Tanpa RAP

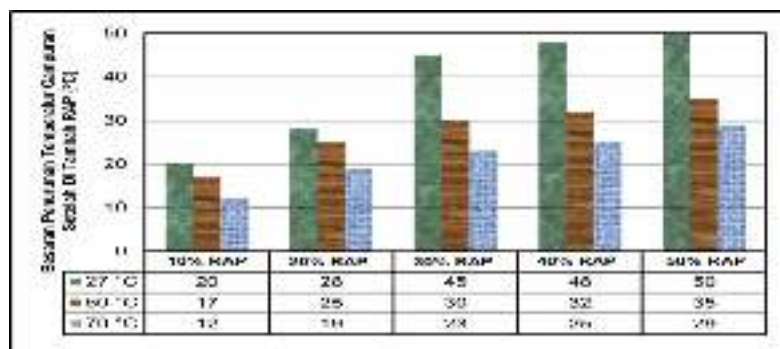
Campuran beraspal yang telah dilakukan pengujian sampai dengan saat ini adalah campuran beraspal panas tanpa dan dengan 10% RAP serta campuran beraspal hangat dengan Asbuton. Sifat untuk masing-masing campuran beraspal tersebut diuraikan berikut ini.

5.3.1. Pengaruh penambahan RAP Terhadap Temperatur Campuran Beraspal

Seperti terlihat pada Tabel 5-5 temperatur pencampuran aspal Pen 60-70 antara 150 °C – 156 °C dan temperatur pemadatan antara 135 °C – 145 °C. Pengaruh variasi penambahan RAP terhadap total campuran beraspal panas telah dilakukan di laboratorium, yaitu seperti terlihat pada Gambar 5-11 dan Gambar 5-12.



Gambar 5-11. Variasi proporsi dan temperatur RAP terhadap temperatur campuran beraspal panas dengan Aspal Pe 60-70



Gambar 5-12. Penurunan temperatur campuran beraspal

Pada Gambar 5-11 dan 5-12, penambahan RAP sebanyak 10% terhadap berat total campuran dengan temperatur RAP sesuai temperatur ruang ($\pm 27^{\circ}\text{C}$) menurunkan temperatur campuran beraspal panas sebesar 20°C dari temperatur pencampuran target 155°C . Dengan proporsi tersebut masih memenuhi untuk target temperatur pemadatan. Untuk penggunaan RAP yang lebih dari 10% maka RAP yang akan digunakan diperlukan pemanasan. Untuk penggunaan RAP sebanyak 20%, diperlukan pemanasan sekitar 20°C , penggunaan RAP sebanyak 30% sekitar 75°C dan penggunaan RAP sebanyak 50% diperlukan pemanasan sekitar 110°C .

5.3.2. Sifat Campuran Beraspal Panas Tanpa dan Dengan RAP

a) Hasil pengujian Marshall

Gradasi agregat campuran, baik untuk campuran beraspal panas yang tanpa RAP maupun yang menggunakan RAP, terdiri atas 3 variasi gradasi sesuai Butir 3.3. Temperatur pencampuran dan pemadatan sesuai viskositas aspal Pen 60-70, yaitu temperatur pencampuran 155°C dan untuk pemadatan 135°C .

Pada saat proses pencampuran dengan penambahan RAP dari Bogor sebesar 10% dalam keadaan dingin (sesuai temperatur ruang sekitar 27°C), sehingga terjadi penurunan temperatur pencampuran sekitar 20°C . Hal demikian karena pengaruh penggunaan RAP yang dingin dan kandungan air dalam RAP tersebut sekitar 1,9%.

Sifat campuran beraspal panas yang tanpa dan dengan menggunakan 10% RAP disajikan pada Tabel 5-14, sedangkan sifat campuran beraspal panas dengan menggunakan 20% RAP dan 30% RAP berturut-turut dan Tabel 5-15 dan Tabel 5-20 serta Gambar 5-13 dan Gambar 5-14.

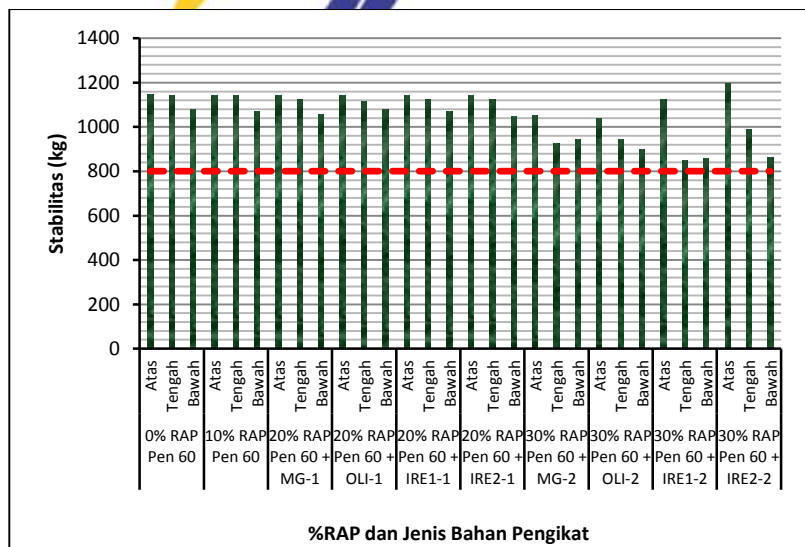
Pada Tabel 5-14 dan Gambar 5-13 serta 5-14 terlihat bahwa ketiga gradasi agregat campuran untuk campuran beraspal panas dengan 10% RAP memiliki kadar aspal dan rongga terisi aspal (*Void Filled Bitumen, VFB*) sedikit lebih rendah dari campuran beraspal panas tanpa RAP. Namun untuk rongga dalam agregat (*Void in Mineral Aggregate, VMA*) dan rongga dalam campuran (*Void in Mix, VIM*) dan Pelelehan juga lebih tinggi dibandingkan

dengan campuran beraspal panas tanpa RAP. Dengan memperhatikan perbedaan data tersebut kemungkinan besar pengaruh penurunan temperatur pada saat pencampuran.

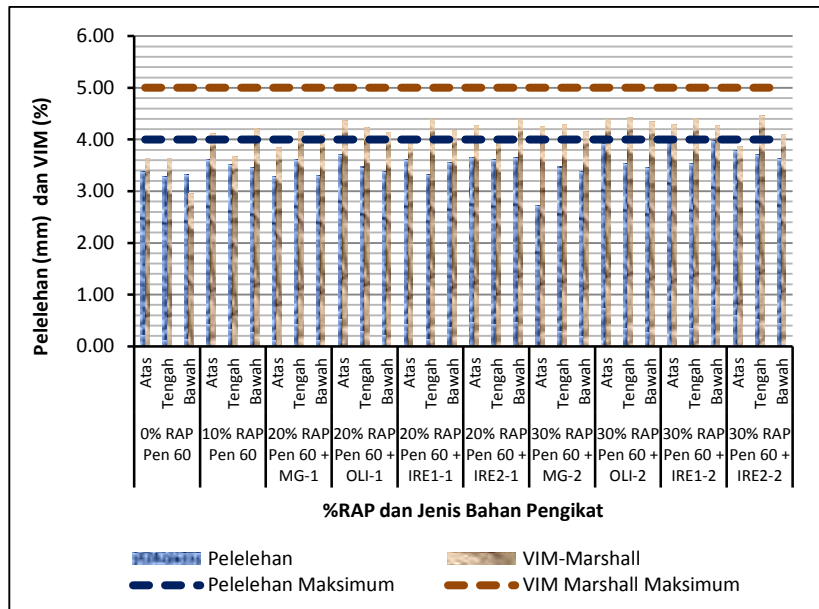
Pada Tabel 5-15 serta Gambar 5-13 dan Gambar 5-14 terlihat bahwa semua sifat campuran beraspal, baik yang tanpa dan yang menggunakan RAP memenuhi persyaratan, sedangkan untuk stabilitas sisa seperti disajikan pada Pada Tabel 5-15 serta Gambar 5-15 untuk campuran beraspal panas gradasi bawah dengan menggunakan 20% RAP dengan bahan pengikat 7,0% Rej IRE2 + 93,0% Pen 60-70 dan campuran beraspal panas gradasi atas dengan menggunakan 30% RAP dengan bahan pengikat 10,4% Rej IRE1 + 89,6% Pen 60-70 serta 10,3% Rej IRE2 + 89,7 Pen 60-70 memiliki stabilitas sisa kurang dari 90%.

Pada umumnya campuran beraspal panas menggunakan RAP 30% memiliki nilai stabilitas Marshall lebih rendah dari pada Stabilitas Marshall pada campuran beraspal yang lainnya.

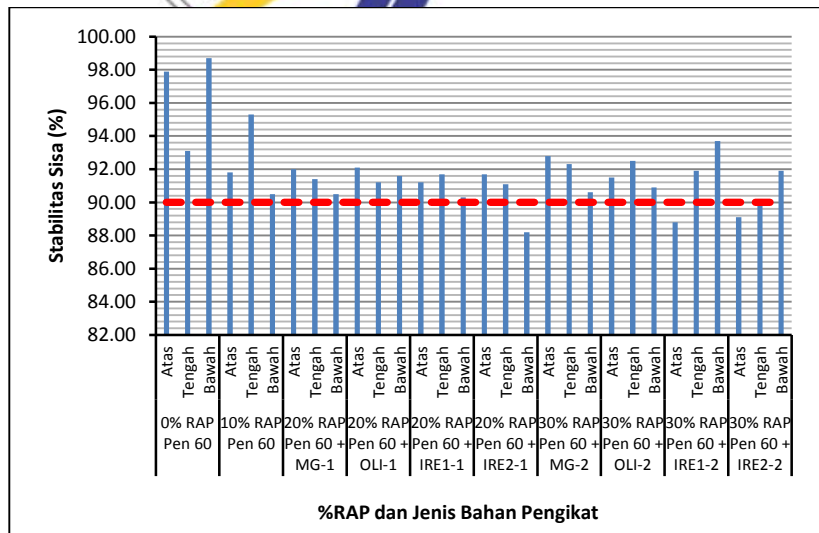
Pada Gambar 5-14 terlihat bahwa VIM campuran beraspal dengan keempat jenis bahan pengikat adalah relatif sama, yaitu pada umumnya di bawah 4%, begitu juga untuk nilai pelelehan relatif sama, yaitu antara 3 mm - 4 mm.



Gambar 5-13. Stabilitas Marshall campuran beraspal panas tanpa dan dengan variasi RAP



Gambar 5-14. Pelelehan dan VIM campuran beraspal panas tanpa dan dengan variasi RAP



Gambar 5-15. Stabilitas sisa Marshall campuran beraspal panas tanpa dan dengan variasi RAP

Tabel 5-14. Sifat campuran beraspal panas tanpa dan dengan
10% RAP bahan pengikat Aspal Pen 60-70

| Parameter Campuran | Hasil Pengujian | | | | | | Spesifikasi* |
|------------------------|-----------------|--------|-------|----------------------------|--------|-------|--------------|
| | 0% RAP | | | 10% RAP Tanpa Pemanasan | | | |
| | Gradasi | | | | | | |
| | Atas | Tengah | Bawah | Atas | Tengah | Bawah | |
| Kadar aspal optimum; % | 5,90 | 5,80 | 5,25 | 5,80 | 5,75 | 5,20 | - |
| Kepadatan; ton/m³ | 2,369 | 2,359 | 2,383 | 2,359 | 2,374 | 2,374 | - |
| VMA; % | 16,8 | 16,9 | 15,8 | 17,1 | 16,3 | 16,1 | Min. 15 |
| VFB; % | 78,07 | 78,24 | 76,1 | 75,62 | 77,21 | 73,68 | Min. 65 |
| VIM marshall; % | 3,63 | 3,63 | 2,95 | 4,12 | 3,66 | 4,21 | 3,0 - 5,0 |
| VIM PRD; % | 2,7 | 3,02 | 3,7 | 2,8 | 2,85 | 2,8 | min. 2 |
| Stabilitas; kg | 1145 | 1141 | 1080 | 1141 | 1140 | 1070 | min. 800 |
| Pelelehan; mm | 3,39 | 3,29 | 3,33 | 3,62 | 3,52 | 3,46 | 2 - 4 |
| Stabilitas sisa; % | 97,9 | 93,10 | 98,7 | 91,8 | 95,3 | 90,5 | Min. 90 |

Keterangan: * Direktorat Jenderal Bina Marga (2014)



Tabel 5-15. Sifat campuran beraspal panas dengan 20% RAP dipanaskan 60 °C dengan bahan pengikat Aspal Pen 60-70 ditambah *Rejuvenator*

| Parameter Campuran | Hasil Pengujian | | | | | | | | | | | | Spesifikasi* |
|------------------------|---------------------------|--------|-------|----------------------------|--------|-------|---------------------------------|--------|-------|---------------------------------|--------|-------|--------------|
| | 5,9% MG + 94,1% Pen 60-70 | | | 8,3% OLI + 91,7% Pen 60-70 | | | 7,1% Rej IRE1 + 92,9% Pen 60-70 | | | 7,0% Rej IRE2 + 93,0% Pen 60-70 | | | |
| | Tipe Gradasi | | | | | | | | | | | | |
| | Atas | Tengah | Bawah | Atas | Tengah | Bawah | Atas | Tengah | Bawah | Atas | Tengah | Bawah | |
| Kadar aspal optimum; % | 5,80 | 5,55 | 5,15 | 5,80 | 5,45 | 5,25 | 5,80 | 5,55 | 5,20 | 5,80 | 5,55 | 5,10 | - |
| Kepadatan; ton/m3 | 2,367 | 2,367 | 2,386 | 2,357 | 2,347 | 2,376 | 2,359 | 2,362 | 2,384 | 2,369 | 2,386 | 2,387 | - |
| VMA; % | 18,8 | 16,3 | 15,6 | 17,1 | 17,4 | 15,9 | 16,9 | 16,6 | 15,7 | 16,8 | 16,6 | 15,5 | Min. 15 |
| VFB; % | 76,77 | 74,19 | 73,42 | 74,29 | 74,04 | 74,48 | 75,62 | 73,54 | 73,31 | 74,33 | 75,41 | 71,40 | Min. 65 |
| VIM marshall; % | 3,84 | 4,15 | 4,09 | 4,37 | 4,23 | 4,14 | 3,98 | 4,38 | 4,18 | 4,26 | 4,05 | 4,39 | 3,0 - 5,0 |
| VIM PRD; % | 2,60 | 2,45 | 2,60 | 2,86 | 2,48 | 2,92 | 2,92 | 2,43 | 2,89 | 2,7 | 2,39 | 2,4 | min. 2 |
| Stabilitas; kg | 1141 | 1126 | 1059 | 1141 | 1114 | 1080 | 1141 | 1126 | 1070 | 1141 | 1126 | 1046 | min. 800 |
| Pelelehan; mm | 3,29 | 3,62 | 3,31 | 3,72 | 3,47 | 3,39 | 3,62 | 3,32 | 3,55 | 3,65 | 3,62 | 3,65 | 2 - 4 |
| Stabilitas sisa; % | 92 | 91,4 | 90,5 | 92,1 | 91,2 | 91,6 | 91,2 | 91,7 | 90,3 | 91,7 | 91,1 | 88,2 | Min. 90 |

Keterangan: * Direktorat Jenderal Bina Marga (2014)

Tabel 5-16. Sifat campuran beraspal panas dengan 30% RAP dipanaskan 75 °C dengan bahan pengikat Aspal Pen 60-70 ditambah
Rejuvenator

| Parameter Campuran | Hasil Pengujian | | | | | | | | | | | | Spesifikasi* |
|------------------------|---------------------------|--------|-------|-----------------------------|--------|-------|----------------------------------|--------|-------|---------------------------------|--------|-------|--------------|
| | 8,9% MG + 91,1% Pen 60-70 | | | 12,1% OLI + 87,9% Pen 60-70 | | | 10,4% Rej IRE1 + 89,6% Pen 60-70 | | | 10,3% Rej IRE2 + 89,7 Pen 60-70 | | | |
| | Tipe Gradasi | | | | | | | | | | | | |
| | Atas | Tengah | Bawah | Atas | Tengah | Bawah | Atas | Tengah | Bawah | Atas | Tengah | Bawah | |
| Kadar aspal optimum; % | 5,80 | 5,40 | 5,10 | 5,75 | 5,40 | 5,15 | 5,90 | 5,55 | 5,30 | 5,95 | 5,40 | 5,30 | - |
| Kepadatan; ton/m3 | 2,359 | 2,370 | 2,379 | 2,355 | 2,363 | 2,379 | 2,361 | 2,357 | 2,381 | 2,353 | 2,352 | 2,383 | - |
| VMA; % | 17,0 | 16,2 | 15,7 | 17,1 | 16,4 | 16,0 | 17,1 | 16,7 | 15,9 | 17,4 | 16,7 | 15,8 | Min. 15 |
| VFB; % | 74,93 | 73,61 | 73,29 | 74,14 | 73,02 | 72,62 | 74,82 | 73,50 | 73,00 | 77,61 | 73,37 | 73,66 | Min. 65 |
| VIM marshall; % | 4,25 | 4,28 | 4,16 | 4,39 | 4,43 | 4,35 | 4,29 | 4,41 | 4,26 | 3,87 | 4,46 | 4,10 | 3,0 - 5,0 |
| VIM PRD; % | 2,7 | 2,55 | 2,4 | 2,6 | 2,70 | 2,4 | 2,2 | 2,49 | 2,5 | 2,7 | 2,66 | 2,5 | min. 2 |
| Stabilitas; kg | 1050 | 927 | 944 | 1038 | 943 | 900 | 1123 | 848 | 859 | 1199 | 990 | 862 | min. 800 |
| Pelelehan; mm | 2,72 | 3,47 | 3,38 | 3,93 | 3,53 | 3,45 | 4,05 | 3,54 | 3,98 | 3,79 | 3,72 | 3,64 | 2 - 4 |
| Stabilitas sisa; % | 92,8 | 92,3 | 90,6 | 91,5 | 92,5 | 90,9 | 88,8 | 91,9 | 93,7 | 89,1 | 90,2 | 91,9 | Min. 90 |

Keterangan: * Direktorat Jenderal Bina Marga (2014)

b) Hasil pengujian *Wheel Tracking Machine*

Pengujian *Wheel Tracking Machine* (WTM) merupakan simulasi dari pembebanan roda kendaraan pada lapisan perkerasan beraspal, dimana beban roda bergerak maju mundur melintas diatas benda uji yang dibuat berupa lapisan perkerasan beraspal. Ketahanan suatu campuran perkerasan beraspal terhadap Deformasi Permanen berupa alur (*rutting*), dapat dievaluasi setelah dilalui sejumlah lintasan atau laju deformasi (*rate of deformation*) dalam satuan mm/menit.

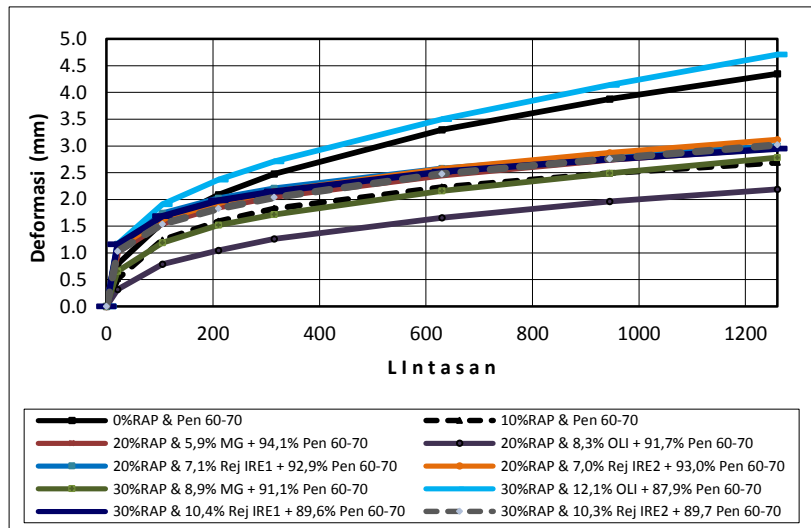
Setelah diperoleh dari hasil pengujian Marshall serta analisis volumetrik campuran beraspal panas, baik yang tanpa maupun yang menggunakan RAP dengan menggunakan variasi bahan pengikat, maka khusus untuk campuran beraspal panas yang menggunakan gradasi agregat ditengah-tengah persyaratan, selanjutnya dilakukan pengujian ketahanan deformasi pada temperature 60°C dengan alat WTM.

Berdasarkan hasil pengujian ketahanan deformasi dengan alat WTM digambarkan dengan hubungan antara nilai deformasi dan waktu, kecepatan deformasi dan stabilitas dinamis, yaitu seperti diperlihatkan pada Tabel 5-17 serta Gambar 5-16 sampai dengan Gambar 5-19.

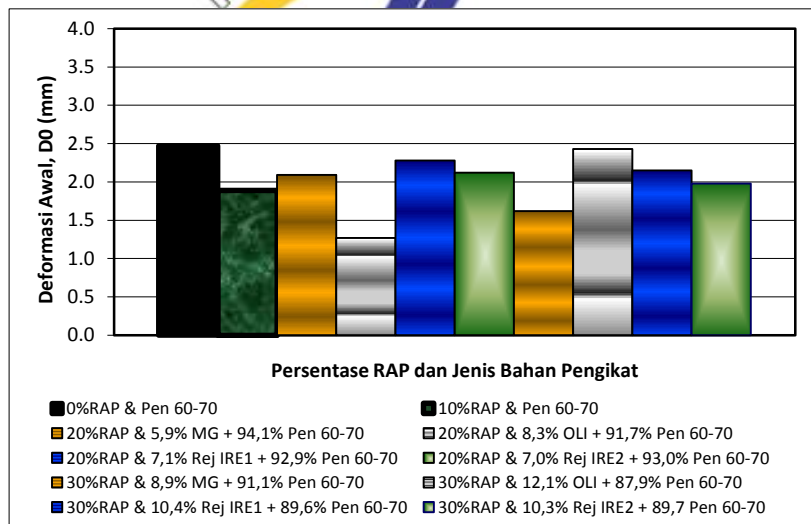
Berdasarkan pada Tabel 4-21 serta Gambar 5-16 sampai dengan Gambar 5-19, diperoleh bahwa deformasi awal dan deformasi total yang tinggi adalah untuk campuran beraspal panas tanpa RAP dengan bahan pengikat aspal Pen 60-70 dan dengan 30% RAP dengan bahan pengikat 12,1% OLI + 87,9% Pen 60-70 (lihat Gambar 5-17 dan Gambar 5-18). Adapun campuran beraspal panas yang memiliki nilai stabilitas dinamis yang tinggi (Gambar 5-19) adalah campuran beraspal panas 10% RAP dengan aspal Pen 60-70 serta campuran beraspal panas 20% RAP dan 30% dengan bahan pengikat yang menggunakan peremaja RejIRE1 (7,1% Rej IRE1 + 92,9% Pen 60-70 dan 10,4% Rej IRE1 + 89,6% Pen 60-70), sedangkan yang memiliki nilai stabilitas dinamis yang rendah adalah campuran beraspal panas tanpa RAP dengan bahan pengikat aspal Pen 60-70 dan yang menggunakan 30% RAP dengan bahan pengikat 12,1% OLI + 87,9% Pen 60-70.

Tabel 5-17. Ketahanan deformasi campuran beraspal panas dengan dan tanpa RAP dengan variasi bahan pengikat

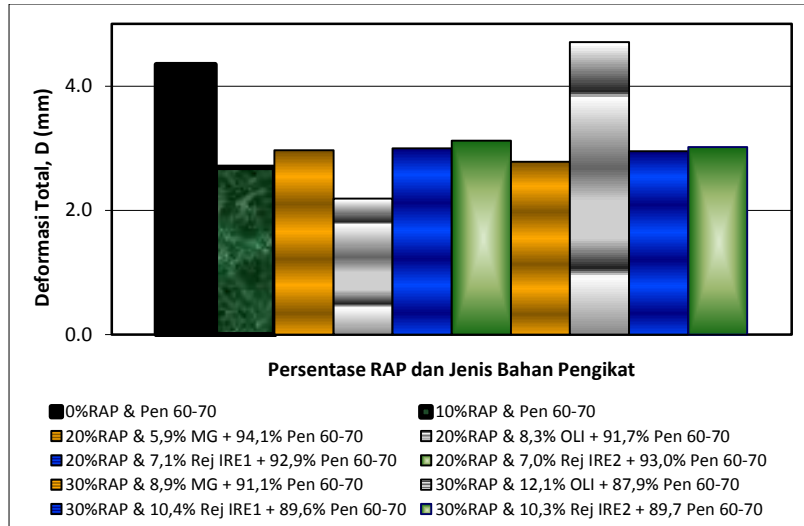
| Waktu (menit) | Lintasan | Hasil pengujian | | | | | | | | | | Satuan |
|--------------------------|----------|-----------------|-----------|---------------------------|----------------------------|---------------------------------|---------------------------------|---------------------------|-----------------------------|----------------------------------|---------------------------------|-----------------|
| | | 0% RAP | 10% RAP | 20% RAP | | | | 30% RAP | | | | |
| | | Bahan pengikat | | | | | | | | | | |
| | | Pen 60-70 | Pen 60-70 | 5,9% MG + 94,1% Pen 60-70 | 8,3% OLI + 91,7% Pen 60-70 | 7,1% Rej IRE1 + 92,9% Pen 60-70 | 7,0% Rej IRE2 + 93,0% Pen 60-70 | 8,9% MG + 91,1% Pen 60-70 | 12,1% OLI + 87,9% Pen 60-70 | 10,4% Rej IRE1 + 89,6% Pen 60-70 | 10,3% Rej IRE2 + 89,7 Pen 60-70 | |
| 0 | 0 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | mm |
| 1 | 21 | 0,79 | 0,52 | 1,03 | 0,32 | 1,16 | 1,10 | 0,66 | 1,17 | 1,16 | 1,03 | mm |
| 5 | 105 | 1,57 | 1,24 | 1,56 | 0,79 | 1,74 | 1,63 | 1,19 | 1,91 | 1,69 | 1,54 | mm |
| 10 | 210 | 2,09 | 1,59 | 1,86 | 1,05 | 2,02 | 1,93 | 1,52 | 2,37 | 1,98 | 1,83 | mm |
| 15 | 315 | 2,48 | 1,83 | 2,06 | 1,26 | 2,21 | 2,15 | 1,72 | 2,71 | 2,15 | 2,04 | mm |
| 30 | 630 | 3,30 | 2,23 | 2,46 | 1,66 | 2,58 | 2,57 | 2,16 | 3,50 | 2,52 | 2,48 | mm |
| 45 | 945 | 3,88 | 2,49 | 2,75 | 1,96 | 2,82 | 2,87 | 2,49 | 4,14 | 2,75 | 2,76 | mm |
| 60 | 1260 | 4,35 | 2,69 | 2,97 | 2,19 | 3,00 | 3,12 | 2,78 | 4,71 | 2,95 | 3,02 | mm |
| DO = Deformasi Awal | | 2,47 | 1,89 | 2,09 | 1,27 | 2,28 | 2,12 | 1,62 | 2,43 | 2,15 | 1,98 | mm |
| RD = Kecepatan Deformasi | | 0,0313 | 0,0133 | 0,0147 | 0,0153 | 0,0120 | 0,0167 | 0,0193 | 0,0380 | 0,0133 | 0,0173 | mm/menit |
| DS = Dinamis Stabilitas | | 1340,4 | 3150,0 | 2863,6 | 2739,1 | 3500,0 | 2520,0 | 2172,4 | 1105,3 | 3150,0 | 2423,1 | lintasan/m m |



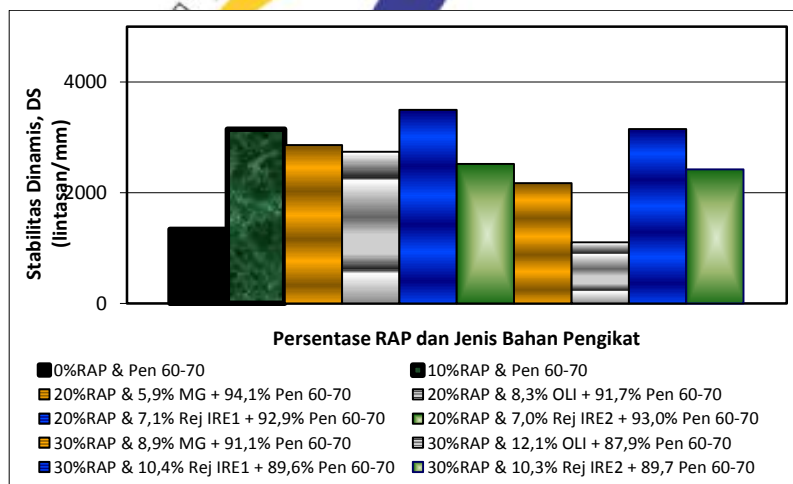
Gambar 5-16. Ketahanan deformasi campuran beraspal panas tanpa dan dengan variasi RAP



Gambar 5-17. Nilai deformasi awal campuran beraspal panas tanpa dan dengan variasi RAP



Gambar 5-18. Nilai deformasi total campuran beraspal panas tanpa dan dengan variasi RAP



Gambar 5-19. Stabilitas dinamis campuran beraspal panas tanpa dan dengan variasi RAP

c) Hasil pengujian Fatik

Kelelahan merupakan suatu fenomena timbulnya retak akibat beban berulang yang terjadi karena pengulangan tegangan atau regangan yang batasnya masih dibawah batas kekuatan material. Pengujian kelelahan dapat menggunakan alat *Beam Fatigue Apparatus* (BFA) atau *Four Point Bending Apparatus* seperti disajikan pada Gambar 5-20.



Gambar 5-20. Alat *Beam Fatigue Apparatus* (BFA) atau *Four Point Bending Apparatus*

Konsep pengujian kelelahan dengan pembebanan 4 titik ini, menggunakan kontrol regangan. Dimana besarnya regangan ditentukan terlebih dahulu, kemudian regangan tersebut berusaha dipertahankan dengan menyesuaikan nilai tegangannya. Kondisi dimana nilai modulus kekakuan lentur (*flexural stiffness*) telah berkurang sebesar 50% dari nilai awal, maka kondisi ini dianggap sebagai kondisi *failure*. Pengulangan pembebanan (*cycles*) sampai kondisi *failure* disebut sebagai umur kelelahan. Pengujian kelelahan dilakukan pada temperatur $20\pm 1^{\circ}\text{C}$, pada balok-balok dengan 2 (dua) variasi campuran yang berbeda pada nilai Kadar Aspal Optimum (KAO). Tiap variasi campuran diuji pada 3 (tiga) tingkat regangan yang berbeda, yaitu sesuai AASHTO T 321-14 dengan regangan yang direkomendasikan antara $250\text{--}750\text{ }\mu\epsilon$. Ketiga tingkatan regangan ini berusaha dipertahankan dengan menyesuaikan nilai

tegangan. Makin besar regangan yang berusaha dipertahankan maka makin besar pula tegangan yang terjadi.

Khusus untuk campuran beraspal panas yang tanpa dan yang menggunakan RAP dengan variasi bahan pengikat yang menggunakan gradasi ditengah-tengah persyaratan diperoleh dari hasil pengujian Marshall serta analisis volumetrik, maka selanjutnya dilakukan pengujian kelelahan digunakan alat *Beam Fatigue Apparatus* (BFA). Hasil pengujian kelelahan digambarkan dengan hubungan antara nilai regangan tarik dan umur kelelahan (*cycles*) untuk setiap campuran beraspal panas yang menggunakan gradasi agregat ditengah-tengah persyaratan gradasi, baik yang tanpa maupun yang menggunakan RAP dengan menggunakan variasi bahan pengikat, yaitu seperti diperlihatkan pada Tabel 5-18 serta Gambar 5-21 dan Gambar 5-22.

Pada Tabel 5-18 serta Gambar 5-21 dan Gambar 5-22 diperoleh bahwa:

- 1) Campuran beraspal panas dengan bahan pengikat aspal Pen 60-70 dengan menggunakan 10% RAP umur kelelahannya menurun dibandingkan dengan tanpa RAP.
- 2) Campuran beraspal panas dengan RAP sebanyak 20% dan 30% dengan menggunakan variasi bahan pengikat, yaitu aspal Pen 60-70 diberi bahan peremaja dengan variasi jenis dan proporsinya, pada umumnya memiliki umur kelelahan lebih panjang dibandingkan dengan umur kelelahan campuran beraspal panas dengan 10% RAP dengan bahan pengikat aspal Pen 60-70 dan campuran beraspal panas dengan bahan pengikat aspal Pen 60-70 tanpa menggunakan RAP.
- 3) Kelelahan campuran beraspal panas dengan menggunakan 20% RAP dengan bahan pengikat aspal Pen 60-70 yang diberi variasi jenis dan proporsi bahan peremaja, diperoleh bahwa campuran beraspal panas dengan bahan pengikat 7,1% Rej IRE1 + 92,9% Pen 60-70 memiliki umur kelelahan lebih panjang dibandingkan dengan variasi jenis dan proporsi ke tiga bahan peremaja lainnya.
- 4) Untuk campuran beraspal panas dengan menggunakan 30% RAP yang memiliki umur kelelahan terpanjang adalah yang menggunakan bahan pengikat 12,1% OLI + 87,9% Pen 60-70, sedangkan untuk yang menggunakan bahan pengikat

10,3% Rej IRE2 + 89,7 Pen 60-70 dan 10,4% Rej IRE1 + 89,6% Pen 60-70 memiliki umur kelelahan yang relatif sama.

Memperhatikan Gambar 4-24 maka modulus campuran beraspal panas dengan menggunakan RAP meningkat sampai dengan 20%, namun untuk penambahan 30% RAP, modulus campuran beraspal panas dengan dengan variasi bahan pengikat mengalami penurunan. Namun demikian modulus campuran beraspal panas dengan menggunakan 30% RAP yang tertinggi adalah yang menggunakan bahan pengikat 10,4% Rej IRE1 + 89,6% Pen 60-70.

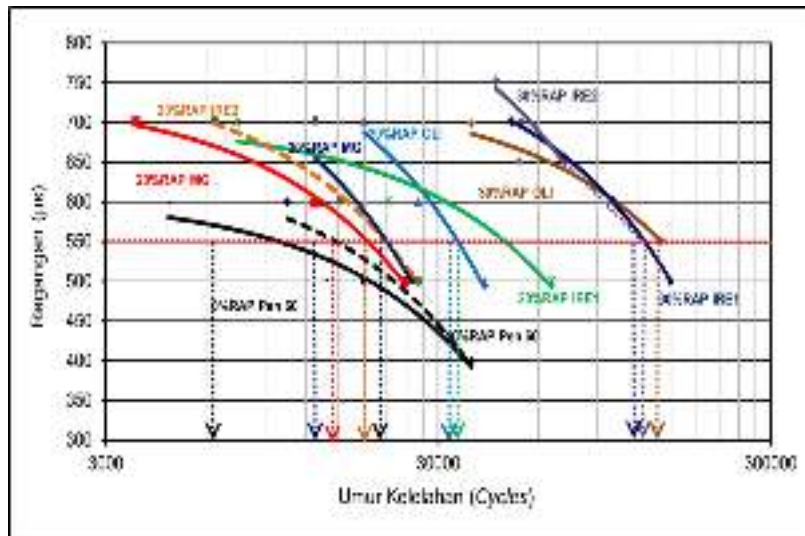


Tabel 5-18. Hubungan antara nilai regangan tarik dan umur kelelahan (*cycles*) untuk campuran beraspal panas dengan dan tanpa RAP dengan variasi bahan pengikat

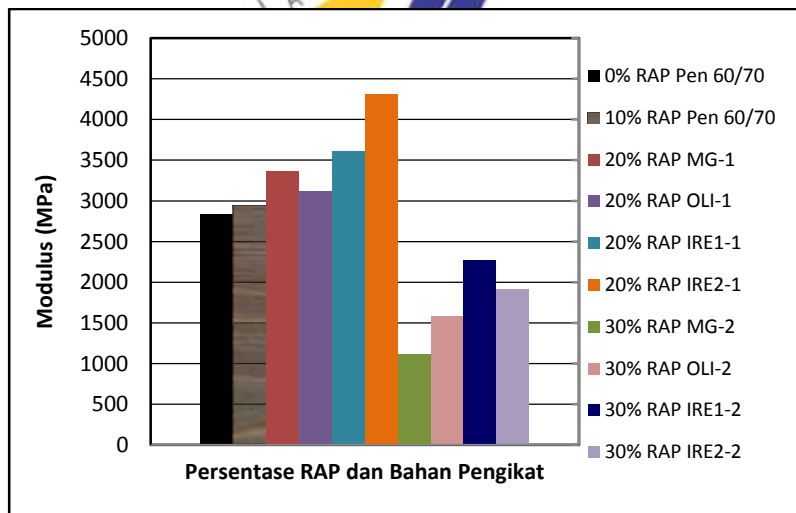
| Jenis Campuran Beraspal Panas | | Regangan Tarik ($\mu\epsilon$) | | Tegangan Tarik (kPa) | | Phase Angle (deg) | | Flexural Stiffness (MPa) | | | | Modulus of Elasticity (MPa) | | | Umur Kelelahan (Cycles) |
|-------------------------------|---------------------------------|----------------------------------|---------|----------------------|---------|-------------------|---------|--------------------------|---------|-------------|-----------|-----------------------------|---------|-----------|-------------------------|
| Proporsi RAP (%) | Bahan Pengikat | Initial | Current | Initial | Current | Initial | Current | Initial | Current | Termination | Rata-rata | Initial | Current | Rata-rata | |
| 0 | Pen 60/70 | 400 | 399 | 1067 | 532 | 31,5 | 31,7 | 2668 | 1332 | 1334 | 2648 | 2851 | 1424 | 2830 | 37550 |
| | | 501 | 500 | 1322 | 657 | 33,6 | 34,8 | 2638 | 1314 | 1319 | | 2820 | 1405 | | 13780 |
| | | 600 | 601 | 1581 | 777 | 34,4 | 37,1 | 2637 | 1293 | 1318 | | 2820 | 1383 | | 4630 |
| 10 | Pen 60/70 | 400 | 401 | 1173 | 584 | 29,9 | 31,4 | 2932 | 1457 | 1466 | 2750 | 3139 | 1560 | 2941 | 37770 |
| | | 500 | 500 | 1360 | 678 | 33,5 | 36 | 2719 | 1357 | 1359 | | 2902 | 1448 | | 17880 |
| | | 600 | 600 | 1558 | 778 | 33,7 | 35,2 | 2598 | 1296 | 1299 | | 2781 | 1388 | | 10530 |
| 20 | 5,9% MG + 94,1% Pen 60-70 | 500 | 500 | 1610 | 803 | 32,9 | 35,2 | 3224 | 1606 | 1612 | 3161 | 3428 | 1708 | 3366 | 23820 |
| | | 599 | 599 | 1849 | 924 | 34,6 | 37,3 | 3090 | 1542 | 1545 | | 3293 | 1643 | | 12700 |
| | | 701 | 699 | 2221 | 1099 | 37 | 38,4 | 3170 | 1572 | 1585 | | 3376 | 1675 | | 3700 |
| | 8,3% OLI + 91,7% Pen 60-70 | 499 | 500 | 1396 | 699 | 31,4 | 34 | 2799 | 1398 | 1399 | 2923 | 2982 | 1490 | 3112 | 41300 |
| | | 600 | 599 | 1829 | 911 | 33,2 | 35,5 | 3050 | 1520 | 1525 | | 3240 | 1615 | | 26020 |
| | | 701 | 699 | 2047 | 1016 | 35,5 | 36,9 | 2920 | 1453 | 1460 | | 3115 | 1550 | | 17880 |
| | 7,1% Rej IRE1 + 92,9% Pen 60-70 | 500 | 498 | 1714 | 855 | 31,6 | 33,3 | 3431 | 1715 | 1715 | 3372 | 3675 | 1837 | 3605 | 65860 |
| | | 601 | 599 | 2140 | 1063 | 31,5 | 35,2 | 3560 | 1776 | 1780 | | 3808 | 1899 | | 21140 |
| | | 701 | 700 | 2191 | 1092 | 33,4 | 36,1 | 3125 | 1561 | 1563 | | 3332 | 1664 | | 7450 |
| | 7,0% Rej IRE2 + 93,0% Pen 60-70 | 500 | 499 | 2050 | 1021 | 29,6 | 32,8 | 4095 | 2046 | 2048 | 4035 | 4372 | 2185 | 4304 | 26090 |
| | | 602 | 598 | 2376 | 1178 | 30,6 | 35,1 | 3946 | 1969 | 1973 | | 4211 | 2101 | | 15210 |
| | | 702 | 700 | 2854 | 1409 | 31,7 | 35,3 | 4064 | 2015 | 2032 | | 4330 | 2146 | | 6390 |

Tabel 5-18. Hubungan antara nilai regangan tarik dan umur kelelahan (*cycles*) untuk campuran beraspal panas dengan dan tanpa RAP dengan variasi bahan pengikat (lanjutan)

| Jenis Campuran Beraspal Panas | | Regangan Tarik (µε) | | Tegangan Tarik (kPa) | | Phase Angle (deg) | | Flexural Stiffness (MPa) | | | | Modulus of Elasticity (MPa) | | | Umur Kelelahan (Cycles) |
|-------------------------------|----------------------------------|---------------------|---------|----------------------|---------|-------------------|---------|--------------------------|---------|-------------|-----------|-----------------------------|---------|-----------|-------------------------|
| Proporsi RAP (%) | Bahan Pengikat | Initial | Current | Initial | Current | Initial | Current | Initial | Current | Termination | Rata-rata | Initial | Current | Rata-rata | |
| 30 | 8,9% MG + 91,1% Pen 60-70 | 501 | 499 | 498 | 244 | 36,9 | 35,2 | 994 | 488 | 497 | 1046 | 1059 | 520 | 1112 | 25010 |
| | | 598 | 600 | 636 | 316 | 37 | 37,7 | 1064 | 527 | 532 | | 1130 | 559 | | 13360 |
| | | 702 | 698 | 758 | 374 | 38,7 | 40,2 | 1080 | 536 | 540 | | 1147 | 570 | | 12780 |
| | 12,1% OLI + 87,9% Pen 60-70 | 551 | 549 | 910 | 452 | 37,7 | 39,3 | 1652 | 823 | 826 | 1480 | 1757 | 875 | 1577 | 141120 |
| | | 651 | 651 | 925 | 462 | 40,3 | 39,3 | 1422 | 710 | 711 | | 1519 | 758 | | 52390 |
| | | 699 | 701 | 954 | 475 | 40,7 | 39,1 | 1365 | 678 | 682 | | 1454 | 723 | | 37640 |
| | 10,4% Rej IRE1 + 89,6% Pen 60-70 | 500 | 500 | 1192 | 624 | 36,2 | 38 | 2386 | 1250 | 1193 | 2115 | 2555 | 1338 | 2265 | 149620 |
| | | 601 | 599 | 1209 | 601 | 39 | 42 | 2014 | 1003 | 1007 | | 2161 | 1076 | | 101110 |
| | | 701 | 699 | 1362 | 677 | 40,9 | 40,6 | 1944 | 969 | 972 | | 2078 | 1036 | | 49680 |
| | 10,3% Rej IRE2 + 89,7 Pen 60-70 | 651 | 647 | 1202 | 597 | 35,1 | 41,7 | 2155 | 1077 | 1077 | 1938 | 1846 | 923 | 1916 | 72140 |
| | | 700 | 701 | 1209 | 598 | 36,8 | 41,4 | 1726 | 854 | 863 | | 1841 | 911 | | 53100 |
| | | 752 | 750 | 1453 | 722 | 37,1 | 41,3 | 1933 | 962 | 966 | | 2061 | 1026 | | 44820 |



Gambar 5-21. Hubungan antara nilai regangan tarik dan umur kelelahan (cycles) untuk campuran beraspal panas dengan dan tanpa RAP dengan variasi bahan pengikat



Gambar 5-22. Modulus campuran beraspal panas dengan dan tanpa RAP dengan variasi bahan pengikat

5.4. Pembahasan Campuran Berapal Panas Rencana Dengan Atau Tanpa RAP

1) Bahan daur ulang (RAP)

- a. RAP yang disediakan untuk kajian ini terdiri atas RAP dari Bogor dan dari Cikampek. Sifat kekerasan aspal RAP Cikampek lebih tinggi dari pada yang dari Bogor, yaitu dicerminkan oleh nilai penetrasi RAP Cikampek yang lebih rendah dan nilai viskositasnya lebih tinggi atau lebih dari dua kali lipat viscositas aspal RAP Bogor.
- b. Hasil pengujian DSR, aspal RAP Bogor memiliki temperatur tinggi kritis $\{T_{C(T)}\}$ dan temperatur menengah kritis $\{T_{C(M)}\}$ sebesar 82,53 °C. Untuk aspal RAP Cikampek memiliki temperatur tinggi kritis $\{T_{C(T)}\}$ dan temperatur menengah kritis $\{T_{C(M)}\}$. Berdasarkan temperatur tinggi dan menengah kritis maka untuk kedua aspal RAP masuk PG 82. Campuran beraspal yang telah dilakukan pengujian sampai dengan saat ini

2) Bahan peremaja

- a. Bahan peremaja (*rejuvenator*) terdiri atas dua jenis peremaja merupakan terdapat langsung dari pasaran, yaitu minyak nabati (MG) dan Oli, sedangkan 2 peremaja lagi merupakan campuran dari beberapa bahan dengan proporsi tertentu, yaitu RejIRE1 dan RejIRE2.
- b. Viskositas MG dan Oli lebih rendah (encer) daripada 2 peremaja lain.

3) Sifat aspal Pen 60 setelah ditambah variasi bahan peremaja.

- a. Penambahan peremaja RejIRE1 pada aspal Pen 60-70 menaikkan nilai penetrasi yang paling tinggi dibandingkan dengan MG, Oli dan RejIRE2.
- b. Penambahan peremaja pada aspal Pen 60-70 menurunkan nilai titik lembek dan viskositas. Membandingkan penurunan nilai titik lembek dan viskositas dari keempat bahan maka yang dengan penambahan Oli penurunannya relatif lebih rendah.
- c. Hasil pengujian dengan DSR pada keempat bahan dengan variasi proporsi yang sama memiliki kecenderungan

penurunan temperatur tinggi kritisnya berbeda. Ketiga peremaja mengalami penurunan $T_{C(T)}$ relatif kecil, kecuali penurunan $T_{C(T)}$ pada RejIRE1 sehingga kemungkinan penggunaan RejIRE1 akan lebih tepat untuk campuran beraspal panas menggunakan RAP yang proporsinya tinggi (25%)

Adapun hasil pengujian DSR setelah PAV atau temperatur menengah kritis $T_{C(M)}$ diperoleh untuk peremaja MG mengalami perubahan menjadi paling terendah, sedangkan untuk Rejuv OLI, RejIRE1 dan RejIRE2 kecenderungan sama seperti pada temperatur tinggi kritis. Untuk itu, penggunaan peremaja MG lebih sedikit dibandingkan dengan ketiga peremaja lainnya.

4) Proporsi RAP dalam campuran beraspal panas dan penggunaan bahan peremaja

Berdasarkan hasil pengujian DSR, baik untuk temperatur tinggi kritis $\{T_{C(T)}\}$ maupun temperatur menengah kritis $\{T_{C(M)}\}$, dan target aspal baru PG 64 (25) atau $T_{blend} (RAP + Asp Pen 60 + Rejuvenator)$, maka yang menentukan berdasarkan temperatur menengah kritis $\{T_{C(M)}\}$. Proporsi RAP dalam campuran ditentukan berdasarkan temperatur menengah kritis $\{T_{C(M)}\}$, $T_{blend} (RAP + Asp Pen 60 + Rejuvenator)$ target dan $T_{C(M)} Asp Pen 60 + Rejuvenator$ atau aspal baru yang tersedia. Berdasarkan $\{T_{C(M)}\}$ RAP Bogor = 82,53°C, $T_{blend} (RAP + Asp Pen 60 + Rejuvenator)$ target PG 64(25) maka untuk:

- a. Aspal baru PG 58(16) proporsi RAP yang diijinkan sebanyak 13,5% dan aspal baru dapat dibuat dengan mencampur aspal Pen 60-70 dengan 3,2% MG atau 4,7% Oli atau 4,0% RejIRE1 atau 3,90% RejIRE2 (keterangan % terhadap total campuran).
- b. Aspal baru PG 52(16) proporsi RAP yang diijinkan sebanyak 20,7% dan aspal baru dapat dibuat dengan mencampur aspal Pen 60-70 dengan 5,9% MG atau 8,3% Oli atau 7,1% RejIRE1 atau 7,0% RejIRE2 (keterangan % terhadap total campuran).
- c. Aspal baru PG 46(0) proporsi RAP yang diijinkan sebanyak 30,2% dan aspal baru dapat dibuat dengan mencampur aspal Pen 60-70 dengan 8,9% MG atau 12,1% Oli atau

10,4% RejIRE1 atau 10,3% RejIRE2 (keterangan % terhadap total campuran).

- d. Penggunaan RAP >10% dengan penetrasi sekitar 22 dmm (lihat Tabel 4-14) pada campuran beraspal panas diperlukan aspal Pen 60-70 yang telah dimodifikasi dengan bahan peremaja agar tidak rentan terhadap retak lelah.

5) Proporsi RAP terhadap temperatur campuran beraspal
Penggunaan RAP tanpa pemanasan terlebih dahulu (temperatur ruang sekitar $\pm 27^{\circ}\text{C}$) pada campuran beraspal panas dengan bahan pengikat aspal Pen 60-70 terbatas sampai dengan 10% terhadap berat total campuran. Untuk penggunaan RAP yang lebih dari 10% maka RAP yang akan digunakan diperlukan pemanasan. Untuk penggunaan RAP sebanyak 20% diperlukan pemanasan sekitar 20°C , penggunaan RAP sebanyak 30% sekitar 75°C dan penggunaan RAP sebanyak 50% diperlukan pemanasan sekitar 110°C .

6) Sifat campuran beraspal panas dengan atau tanpa RAP

- a. Sifat campuran beraspal panas, baik yang tanpa maupun yang menggunakan 10% RAP memiliki kualitas yang tidak jauh berbeda untuk ketiga gradasi agregat campuran serta memenuhi persyaratan. Adanya sedikit perbedaan pada volumetrik campuran dan parameter Marshall kemungkinan besar pengaruh penurunan temperatur pada saat pencampuran karena penggunaan RAP kondisi dingin.
- b. Pada umumnya semua sifat campuran beraspal, baik yang tanpa dan yang menggunakan RAP memenuhi persyaratan, kecuali untuk stabiitas sisa campuran beraspal panas gradasi bawah dengan menggunakan 20% RAP dengan bahan pengikat 7,0% Rej IRE2 + 93,0% Pen 60-70 dan campuran beraspal panas gradasi atas dengan menggunakan 30% RAP dengan bahan pengikat 10,4% Rej IRE1 + 89,6% Pen 60-70 serta 10,3% Rej IRE2 + 89,7 Pen 60-70 memiliki stabilitas sisa kurang dari 90%.
- c. Memperhatikan data Stabilitas Marshall, pada umumnya campuran beraspal panas dengan menggunakan RAP 30% lebih rendah dari pada Stabilitas Marshall pada campuran beraspal panas yang lainnya.

- d. Berdasarkan hasil pengujian ketahanan deformasi dengan alat WTM diperoleh bahwa untuk campuran beraspal panas tanpa RAP dengan bahan pengikat aspal Pen 60-70 dan dengan 30% RAP dengan bahan pengikat 12,1% OLI + 87,9% Pen 60-70 memiliki deformasi awal dan deformasi total yang tinggi serta memiliki nilai stabilitas dinamis yang rendah sehingga campuran beraspal panas tersebut rentan terhadap terjadinya deformasi. Adapun campuran beraspal panas yang memiliki nilai stabilitas dinamis yang tinggi adalah campuran beraspal panas 10% RAP dengan aspal Pen 60-70 serta campuran beraspal panas dengan 20% RAP dan 30% dengan bahan pengikat yang menggunakan peremaja RejIRE1 (7,1% Rej IRE1 + 92,9% Pen 60-70 dan 10,4% Rej IRE1 + 89,6% Pen 60-70). Untuk itu, sifat campuran beraspal dengan bahan pengikat yang dimodifikasi bahah peremaja Rej IRE1 lebih tahan terhadap deformasi.
- e. Hasil pengujian kelelahan menggunakan alat BFA diperoleh bahwa campuran beraspal panas dengan bahan pengikat aspal Pen 60-70 dengan menggunakan 10% RAP umur kelelahannya menurun, sedangkan untuk campuran beraspal panas dengan RAP sebanyak 20% dan 30% dengan menggunakan variasi bahan pengikat, yaitu aspal Pen 60-70 diberi bahan peremaja dengan variasi jenis dan proporsinya, pada umumnya memiliki umur kelelahan lebih panjang. Campuran beraspal panas dengan menggunakan RAP sebanyak 20% terhadap berat total campuran adalah yang menggunakan bahan pengikat aspal Pen 60-70 yang dimodifikasi RejIRE1 dengan komposisi 7,1% Rej IRE1 + 92,9% Pen 60-70.
- f. Penggunaan RAP sebanyak 30% pada campuran beraspal panas serta memiliki umur kelelahan terpanjang adalah yang menggunakan bahan pengikat 12,1% OLI + 87,9% Pen 60-70, sedangkan untuk yang menggunakan bahan pengikat 10,3% Rej IRE2 + 89,7 Pen 60-70 dan 10,4% Rej IRE1 + 89,6% Pen 60-70 memiliki umur kelelahan yang relatif sama.

- g. Penggunaan RAP sebanyak 30% pada campuran beraspal panas menurunkan modulus campuran beraspal panas.
- h. Kesimpulan umum sifat campuran beraspal panas dengan menggunakan RAP serta bahan peremaja adalah sebagai berikut:
- (1) Bahan peremaja minyak nabati (MG)
Ketahanan terhadap deformasi campuran beraspal cukup baik, namun untuk penggunaan RAP makin banyak umur kelelahannya menurun atau lebih rendah dari pada yang peremaja lainnya, sehingga rentan terhadap retak.
 - (2) Bahan peremaja Oli SAE-10 (OLI)
Ketahanan terhadap deformasi campuran beraspal kurang baik terutama untuk penggunaan RAP yang makin banyak, namun untuk umur kelelahannya cukup baik dan untuk penggunaan RAP 30% umur kelelahannya terbaik dari pada yang peremaja lainnya.
 - (3) Bahan peremaja RejIRE1 dan RejIRE2
Ketahanan terhadap deformasi campuran beraspal yang menggunakan bahan peremaja RejIRE1 dan RejIRE2 sangat baik (umumnya di atas 2500 lintasan/mm). Stabilitas dinamis untuk penggunaan RAP sebanyak 30%, penggunaan bahan peremaja RejIRE1 paling baik dan yang kedua terbaik yang menggunakan bahan peremaja RejIRE2 sehingga kemungkinan tidak rentan terhadap terjadinya deformasi. Pada penggunaan RAP sebanyak 30% juga penggunaan bahan peremaja RejIRE1 dan RejIRE2 memiliki umur kelelahan yang panjang dan relatif sama untuk keduanya. Berdasarkan data tersebut penggunaan bahan peremaja RejIRE1 dan RejIRE2 pada campuran beraspal panas yang menggunakan RAP menjadi salah satu alternatif untuk digunakan.

6. SIFAT CAMPURAN BERASPAL HANGAT ASBUTON HASIL KAJIAN SEKALA LABORATORIUM

6.1. Sifat Bahan

6.1.1. Sifat Asbuton

Jenis Asbuton yang digunakan untuk kajian bahan tambalan cepat mantap adalah asbuton yang ada di pasaran, yaitu jenis asbuton dengan kandungan bitumen yang lunak (berasal dari sumber Lawele) atau yang dikenal LGA (*Lawele Granural Asphalt*). Data Asbuton LGA hasil pengadaan diuji analisa saringan 100% lolos saringan 3/8 inci (9,5 mm), sedangkan data hasil ekstraksi disajikan pada Tabel 6-1.

Tabel 6-1. Sifat Asbuton LGA hasil ekstraksi

| No | Jenis Pengujian | Metode Pengujian | Hasil Pengujian |
|-------------------------------|--------------------------------------|------------------|-----------------|
| 1 | Kadar aspal; % | SNI 03-3640-1994 | 26,76 |
| 2 | Kadar air; % | SNI-2490-2008 | 2.0 |
| 3 | Analisa saringan; % berat lolos | SNI 03-6822-2002 | |
| | 1/2" | | 100 |
| | 3/8" | | 100 |
| | No. 4 | | 100 |
| | No. 8 | | 99,67 |
| | No. 16 | | 99,37 |
| | No. 30 | | 99,00 |
| | No. 50 | | 94,56 |
| | No. 100 | | 70,55 |
| | No. 200 | | 49,47 |
| 4 | Berat jenis mineral | | 2,52 |
| Sifat Bitumen Hasil Ekstraksi | | | |
| 1 | Penetrasi; dmm | SNI 2456 : 2011 | 105,6 |
| 2 | Titik lembek; °C | SNI 2434 : 2011 | 47,9 |
| 3 | Daktilitas; cm | SNI 2432 : 2011 | >140 |
| 4 | Berat jenis | SNI 2441 : 2011 | 1,0502 |
| 5 | Titik nyala; °C | SNI 2433 : 2011 | 190 |
| 6 | Viskositas absolut pada 60°C; Pa.s | SNI 03-6440-2000 | 241,7 |
| 7 | Viskositas kinematis pada 135°C; cSt | SNI 7729:2011 | 388,8 |

Tabel 6-1. Sifat Asbuton LGA hasil ekstraksi (lanjutan)

| No | Jenis Pengujian | Metode Pengujian | Hasil Pengujian |
|---|---|------------------|-----------------|
| Sifat Bitumen Setelah Kehilangan Berat (TFOT) | | | |
| 1 | Penurunan berat; % semula | SNI 06-2440-1991 | 2,8824 |
| 2 | Penetrasi Setelah TFOT; dmm | SNI 2456 : 2011 | 40 |
| 3 | Titik lembek Setelah TFOT; °C | SNI 2434 : 2011 | 55,6 |
| 4 | Daktilitas Setelah TFOT; cm | SNI 2432 : 2011 | >140 |
| 5 | Viskositas absolut pada 60°C setelah TFOT; Pa.s | SNI 03-6440-2000 | 628,53 |
| 6 | Viskositas kinematis pada 135°C setelah TFOT; cSt | SNI 7729:2011 | 691,9 |

Berdasarkan data pada Tabel 6-1, terlihat bahwa kadar bitumen Asbuton LGA kadar bitumennya masuk Tipe B 50/30 (lihat Tabel 4-4) namun memiliki nilai Penetrasi tinggi (105,6 dmm) dan Titik Nyala yang lebih rendah, yaitu 190 °C (< 232 °C). Bila memperhatikan sifat aspal hasil TFOT, seperti nilai penetrasi mengalami penurunan yang signifikan, yaitu sekitar 2,5 kali dari nilai semula (40 dmm). Perubahan kekerasan tersebut tendensi bitumen Asbuton masih mengandung minyak ringan yang relatif masih tinggi (sekitar 2,8824%)

Ukuran mineral Asbuton LGA hasil ekstraksi sangat halus, yaitu yang lolos saringan No. 200 sebanyak 49,47%. Untuk itu, proporsi penggunaannya dalam campuran beraspal kemungkinan tidak dapat banyak karena umumnya batasan maksimum agregat yang lolos saringan No. 200 pada spesifikasi maksimum 10%.

Berdasarkan hasil pengujian DSR pada bitumen Asbuton hasil pemulihan serta hasil penuaan dengan RTFO disajikan pada Tabel 6-2 dan Gambar 6-1, sedangkan hasil pengujian DSR setelah PAV disajikan pada Gambar 6-2. Berdasarkan data tersebut dengan menggunakan Persamaan 1 sampai dengan Persamaan 6 diperoleh temperatur tinggi kritis $\{T_{C(T)}\}$ dan temperatur menengah kritis $\{T_{C(M)}\}$, yaitu masuk kelas PG 64(22), data lebih rincinya adalah:

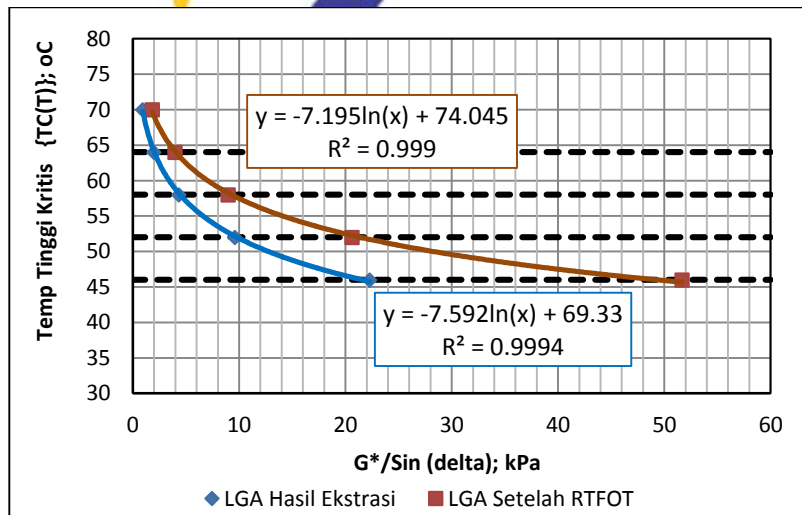
- ✓ Temp Tinggi Kritis $\{T_{C(T)}\}$ LGA:
 - Hasil Ekstraksi = 69,56 °C
 - Setelah RTFOT = 68,56 °C
 - $T_{C(T)}$ terendah = 68,56 °C

✓ Temp Menengah Kritis $\{T_{C(M)}\}$ Setelah PAV = 21,80 °C

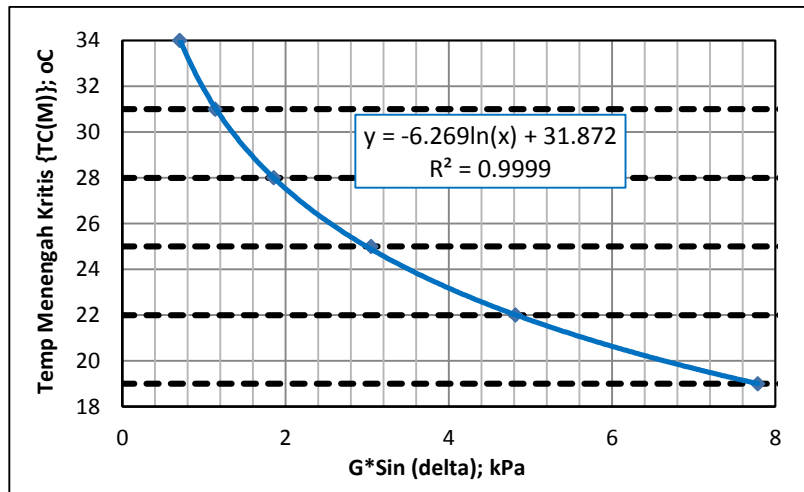
Berdasarkan data di atas, bitumen asbuton hasil ekstraksi memiliki ketahanan terhadap deformasi sampai dengan temperatur perkerasan sebesar 68,56 °C, namun sesuai temperatur menengah kritis $\{T_{C(M)}\}$ maka bitumen asbuton dapat terjadi retak pada temperatur 21,80 °C. Berdasarkan data tersebut, bila digunakan sebagai bahan pengikat perlu dicampur dengan bahan yang lebih tahan retak.

Tabel 6-2. Hasil pengujian DSR Asbuton LGA

| Temperatur °C | G*/Sin(δ); (kPa) | |
|---------------|---------------------------|---------------|
| | Hasil Ekstraksi | Setelah RTFOT |
| 46 | 22,30 | 51,69 |
| 52 | 9,62 | 20,62 |
| 58 | 4,33 | 8,98 |
| 64 | 1,98 | 3,98 |
| 70 | 0,95 | 1,83 |



Gambar 6-1. Hubungan tempertaur tinggi kritis LGA dengan $G^*/\sin(\delta)$



Gambar 6-2. Hubungan tempertaur menengah kritis LGA dengan $G^* \sin(\delta)$

6.1.2. Sifat Bahan Peremaja Hangat

Seperti ditelaah disampaikan pada Surat Edaran Menteri Pekerjaan Umum No. 10/SE/M/2013 bahwa campuran beraspal hangat dengan asbuton sebagai bahan pengikat adalah bitumen asbuton yang diberi peremaja hangat. Sesuai hasil pengujian asbuton yang diperoleh dari pasaran ternyata memiliki penetrasi tinggi sehingga tidak masuk ke kelas asbuton Tipe 50/30. Untuk mengetahui apakah sifat campuran yang menggunakan tipe asbuton ini memenuhi persyaratan yang telah ditetapkan sesuai Tabel 4-7. Data hasil pengujian peremaja hangat 1000 (SC-1000) disajikan pada Tabel 6-3.

Sifat peremaja hangat hasil 1000 (SC-1000) pengujian seperti yang disajikan pada Tabel 6-3 memenuhi persyaratan PH 1000 sesuai Tabel 2-8. Temperatur pencampuran dan pemadatan peremaja hangat 1000, berturut-turut adalah antara 120 °C - 126 °C dan 109 °C - 115 °C. Berhubung asbuton yang digunakan memiliki nilai penetrasi bitumen hasil ekstraksi dan pemulihan sekitar 100 dmm, maka kemungkinan diperlukan peremaja hangat yang memiliki kekentalan yang tinggi. Untuk mengantisipasi kemungkinan tersebut, telah dibuat juga 3 tipe peremaja hangat 3000 (SC-3000), yaitu campuran dari 90% aspal Pen 60-70 + 10%

solar, 89% aspal Pen 60-70 + 6% Oli SAE-10 + 10% solar dan 89% aspal Pen 60-70 + 6% Minyak Goreng + 10% solar. Sifat ke tiga tipe SC-3000 sesuai hasil pengujian disajikan pada Tabel 6-4. Peremaja hangat dengan karakteristik seperti disajikan pada Tabel 6-4 memenuhi persyaratan SC-3000 sesuai ASTM D2016/D2026M.

Tabel 6-3. Sifat fisik peremaja hangat (SC-1000) untuk campuran beraspal hangat dengan Asbuton

| No. | Jenis Pengujian | Metode Pengujian | Hasil Pengujian |
|-----|---|------------------|-----------------|
| 1. | Viskositas SF pada 60°C; cSt | SNI 7729-2011 | putus2 |
| | Viskositas SF pada 82,2°C; cSt | SNI 7729-2011 | 1304,9 |
| 2. | Titik Nyala; °C | SNI 06-6722-02 | 315 |
| 3. | Berat jenis | | 1,0038 |
| 4. | Penyulingan : | SNI 06-2488-91 | |
| | Sulingan pada 190 °C; % isi | | - |
| | 225 °C; % isi | | - |
| | 260 °C; % isi | | - |
| | 315 °C; % isi | | - |
| | 360 °C; % isi | | 99,6 |
| | Sisa pada 360 °C; % isi | | 99,6 |
| 5. | Kelarutan dalam C ₂ HCl ₃ ; % | SNI 06-2438-91 | 99,88 |
| 6. | Kadar air; % | SNI 06-2490-91 | 0 |
| 7. | Perkiraan temperatur pencampuran; °C | ASSHTO-72-1997 | 120-126 |
| 8. | Perkiraan temperatur pemadatan; °C | ASSHTO-72-1997 | 109-115 |

Tabel 6-4. Sifat fisik peremaja hangat (SC-3000) untuk campuran beraspal hangat dengan Asbuton

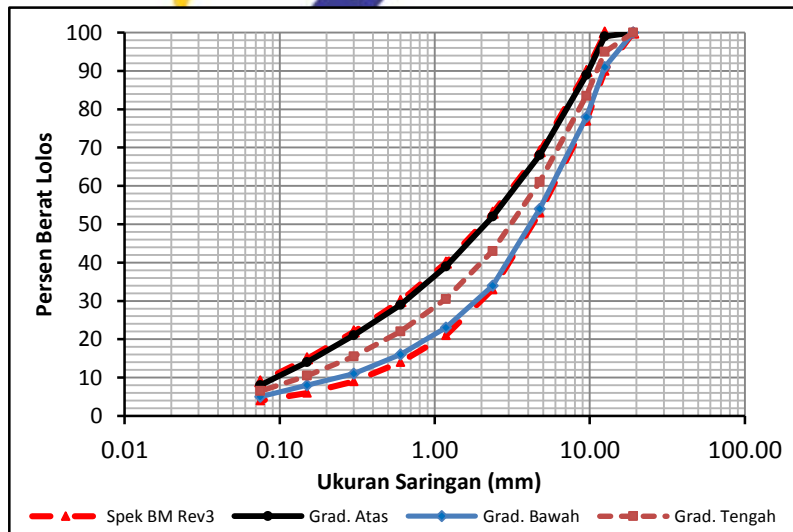
| No. | Jenis Pengujian | Metode Pengujian | Hasil Pengujian | | |
|-----|---|------------------|--------------------------|---|--|
| | | | 90%Pen 60-70 + 10% Solar | 89% aspal Pen 60-70 + 6% Oli SAE-10 + 10% Solar | 89% aspal Pen 60-70 + 6% Minyak Goreng + 10% Solar |
| 1. | Viskositas SF pada 60 °C; cSt | SNI 7729-2011 | 3779 | 5706 | 5046 |
| 2. | Titik Nyala; °C | SNI 06-6722-02 | 150 | 178 | 197 |
| 3. | Berat jenis | | 0,9768 | 1.0217 | 1,0128 |
| 4. | Penyulingan : | SNI 06-2488-91 | | | |
| | Sulingan pada 190 °C; % isi | | - | - | - |
| | 225 °C; % isi | | - | - | - |
| | 260 °C; % isi | | - | - | - |
| | 315 °C; % isi | | - | - | - |
| | Sisa pada 360 °C; % isi | | 0,85 | 0,82 | 0,70 |
| | Kadar residu; % | | 99,15 | 99,18 | 99,30 |
| 5. | Kelarutan dalam C ₂ HCl ₃ ; % | SNI 06-2438-91 | 99,859 | 99,8804 | 99,961 |
| 6. | Penetrasi pada 25 °C; 0,1 mm | SNI 2456 : 2011 | - | 355 | - |
| 7. | Daktilitas pada 25 °C; cm | SNI 2432 : 2011 | >140 | >140 | >140 |
| 8. | Viskositas residu pada 60 °C | SNI 06-6721-02 | 11777 | 13851 | 13201 |
| 9. | Kadar air; % | SNI 06-2490-91 | 0 | 0 | 0 |
| 10. | Perkiraan temperatur pencampuran; °C | ASSHTO-72-1997 | 118-123 | 121-133 | 120-132 |
| 11. | Perkiraan temperatur pemadatan; °C | ASSHTO-72-1997 | 108-115 | 111-118 | 111-117 |

6.2. Gradasi Campuran Berapal Hangat Asbuton

Gradasi agregat campuran untuk pembuatan campuran beraspal hangat asbuton adalah terdiri dari 3 gradasi, yaitu gradasi atas, tengah dan bawah, seperti disajikan pada Tabel 6-5 dan Gambar 6-3.

Tabel 6-5. Gradasi agregat campuran beraspal hangat asbuton

| Ukuran Saringan | | Gradasi Rencana (% Brt Lolos) | | | Spesifikasi Gradasi (% Berat Lolos) | |
|-----------------|-------|-------------------------------|-------|--------|-------------------------------------|-------|
| ASTM | (mm) | Atas | Bawah | Tengah | Min. | Maks. |
| 3/4" | 19,00 | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 |
| 1/2" | 12,50 | 99,0 | 91,0 | 95,0 | 90 | 100 |
| 3/8" | 9,50 | 89,0 | 78,0 | 83,5 | 77 | 90 |
| #4 | 4,75 | 68,0 | 54,0 | 61,0 | 53 | 69 |
| #8 | 2,36 | 52,0 | 34,0 | 43,0 | 33 | 53 |
| #16 | 1,18 | 39,0 | 23,0 | 30,5 | 21 | 40 |
| #30 | 0,60 | 29,0 | 16,0 | 22,0 | 14 | 30 |
| #50 | 0,30 | 21,0 | 11,0 | 15,5 | 9 | 22 |
| #100 | 0,150 | 14,0 | 8,0 | 10,5 | 6 | 15 |
| #200 | 0,075 | 8,0 | 5,0 | 6,5 | 4 | 9 |



Gambar 6-3. Variasi gradasi campuran rencana

6.3. Sifat Campuran Beraspal Hangat Asbuton

Agregat yang digunakan untuk campuran beraspal hangat asbuton adalah sama dengan agregat yang digunakan untuk campuran beraspal panas menggunakan RAP. Gradasi agregat campuran beraspal hangat asbuton yang dipilih adalah terdiri atas gradasi batas atas, tengah dan gradasi batas bawah. Penggunaan Asbuton terdiri atas 3 variasi, yaitu 5%, 7,5% dan 10%. Temperatur pencampuran dan pemadatan sesuai viskositas peremaja hangat yang menggunakan peremaja SC-1000 dan peremaja SC-3000, yaitu temperatur pencampuran 125 °C dan untuk pemadatan 110 °C.

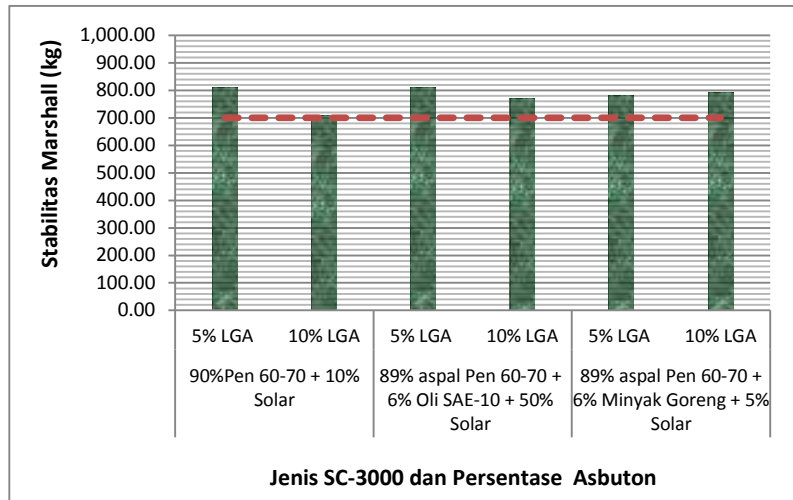
Pada saat proses pencampuran dengan penambahan Asbuton sebanyak 5%, 7,5% dan 10% temperatur pencampuran mengalami penurunan, yaitu berturut-turut sekitar 5 °C, 9 °C dan 15 °C.

Sifat campuran beraspal hangat dengan penambahan variasi proporsi Asbuton dengan gradasi batas atas, tengah dan batas bawah yang menggunakan peremaja SC-1000 disajikan pada Tabel 6-6. Pada Tabel 6-6 seluruhnya tidak memenuhi persyaratan. Hal tersebut pengaruh tingginya nilai penetrasi (>100 dmm) yang digunakan.

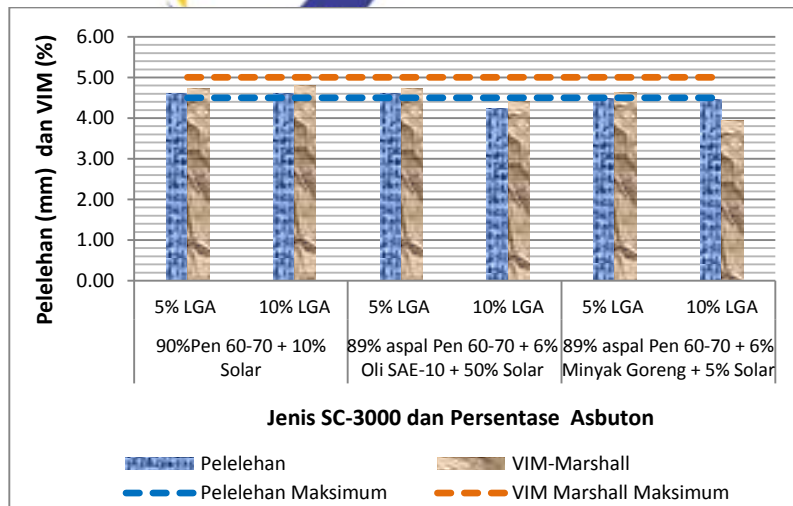
Berdasarkan fakta tersebut, agar Asbuton yang memiliki nilai penetrasi yang tinggi dapat digunakan dengan optimal maka kajian lanjutan adalah menguji campuran beraspal hangat asbuton dengan menggunakan gradasi tengah-tengah spesifikasi dengan menggunakan peremaja hangat yang memiliki viskositas lebih tinggi (lebih kental), yaitu SC-3000. Pada Tabel 6-7 dan Gambar 6-4 sampai dengan Gambar 6-6 disajikan hasil pengujian sifat campuran beraspal hangat asbuton dengan peremaja hangat 3 tipe SC-3000 dengan menggunakan LGA sebanyak 5% dan 10% dengan metoda pencampuran basah.

Sifat campuran beraspal hangat asbuton dengan peremaja hangat 3 tipe SC-3000 dengan menggunakan LGA sebanyak 5% dan 10% sesuai Tabel 6-7, Gambar 6-4 dan Gambar 6-5, terlihat bahwa volumetrik campuran serta stabilitas dan pelelehannya memenuhi persyaratan. Namun sesuai Gambar 6-6 ditemukan bahwa campuran beraspal hangat asbuton dengan 10% asbuton dan menggunakan peremaja hangat dengan jenis dan komposisi

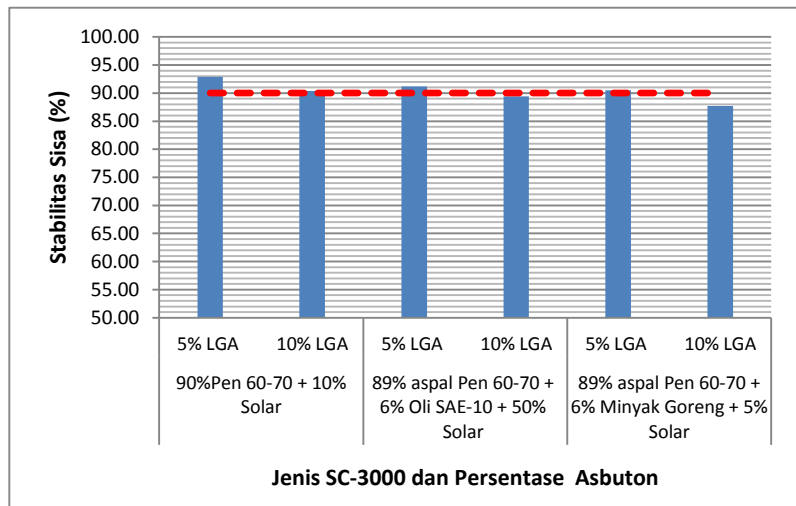
89% aspal Pen 60-70 + 6% Oli SAE-10 + 50% Solar dan 89% aspal Pen 60-70 + 6% Minyak Goreng + 5% Solar memiliki nilai stabilitas sisa sedikit lebih rendah dari yang disyaratkan. Untuk itu, kemungkinan besar komposisinya perlu diperbaiki lagi.



Gambar 6-4. Stabilitas Marshall campuran beraspal hangat asbuton dengan proporsi asbuton 5% dan 10% dengan peremaja 3 tipe SC-3000



Gambar 6-5. Pelelehan dan VIM campuran beraspal hangat asbuton dengan proporsi asbuton 5% dan 10% dengan peremaja 3 tipe SC-3000



Gambar 6-6. Stabilitas sisa Marshall campuran beraspal hangat asbuton dengan proporsi asbuton 5% dan 10% dengan peremaja 3 tipe SC-3000

Tabel 6-6. Sifat campuran beraspal hangat dengan peremaja hangat 1000 (SC-1000)

| Parameter Campuran | Hasil Pengujian Campuran Beraspal Hangat Asbuton dengan Peremaja hangat SC-1000 | | | | | | | | | Spesifikasi* |
|------------------------|---|----------|---------|----------------|----------|---------|---------------------|----------|---------|--------------|
| | Gradasi Batas Atas | | | Gradasi Tengah | | | Gradasi Batas Bawah | | | |
| | 5% LGA | 7,5% LGA | 10% LGA | 5% LGA | 7,5% LGA | 10% LGA | 5% LGA | 7,5% LGA | 10% LGA | |
| Kadar aspal optimum; % | 6,15 | 5,85 | 5,75 | 5,80 | 6,30 | 6,40 | 5,75 | 5,85 | 5,75 | - |
| Kepadatan; ton/m³ | 2,343 | 2,328 | 2,304 | 2,34 | 2,321 | 2,309 | 2,416 | 2,328 | 2,304 | - |
| VMA; % | 17,7 | 17,8 | 18,4 | 17,3 | 18,6 | 18,8 | 17,4 | 17,8 | 18,4 | Min. 15 |
| VFB; % | 78,33 | 74,47 | 68,41 | 76,33 | 75,47 | 74,78 | 75,15 | 74,47 | 68,41 | Min. 65 |
| VIM marshall; % | 3,82 | 4,58 | 4,85 | 4,06 | 4,56 | 4,72 | 4,32 | 4,58 | 4,80 | 3,0 - 5,0 |
| VIM PRD; % | 2,87 | 3,44 | 3,64 | 3,05 | 3,42 | 3,54 | 3,24 | 3,44 | 3,60 | min. 2 |
| Stabilitas; kg | 680 | 590 | 580 | 580 | 525 | 580 | 480 | 590 | 580 | min. 700 |
| Pelelehan; mm | 3,92 | 3,79 | 3,89 | 3,99 | 3,93 | 3,98 | 4,14 | 3,79 | 3,89 | 2 - 4,5 |

Keterangan: * Kementerian Pekerjaan Umum (2013)

Tabel 6-7. Sifat campuran beraspal hangat dengan peremaja hangat SC-3000

| Parameter Campuran | Hasil Pengujian Campuran Beraspal Hangat Asbuton dengan Peremaja hangat SC-3000 | | | | | | Spesifikasi* |
|------------------------|---|---------|---|---------|---|---------|--------------|
| | 90%Pen 60-70 + 10% Solar | | 89% aspal Pen 60-70 + 6% Oli SAE-10 + 50% Solar | | 89% aspal Pen 60-70 + 6% Minyak Goreng + 5% Solar | | |
| | Gradasi Tengah | | Gradasi Tengah | | Gradasi Tengah | | |
| | 5% LGA | 10% LGA | 5% LGA | 10% LGA | 5% LGA | 10% LGA | |
| Kadar aspal optimum; % | 5,75 | 5,85 | 5,70 | 5,80 | 5,70 | 5,80 | - |
| Kepadatan; ton/m³ | 2,352 | 2,344 | 2,352 | 2,351 | 2,343 | 2,356 | - |
| VMA; % | 16,95 | 17,4 | 16,95 | 17,13 | 17,2 | 16,93 | Min. 15 |
| VFB; % | 72 | 72,3 | 72 | 74,3 | 73,1 | 79,7 | Min. 65 |
| VIM marshall; % | 4,74 | 4,81 | 4,74 | 4,40 | 4,64 | 3,95 | 3,0 - 5,0 |
| VIM PRD; % | 3,93 | 3,4 | 3,05 | 3,23 | 3,36 | 3,47 | Min. 2 |
| Stabilitas; kg | 811 | 709 | 811 | 770 | 781 | 794 | Min. 700 |
| Pelelehan; mm | 4,6 | 4,6 | 4,6 | 4,23 | 4,49 | 4,46 | 2 - 4,5 |
| Stabilitas sisa; % | 92,9 | 90,4 | 91,2 | 89,4 | 90,5 | 87,7 | Min. 90 |

Keterangan: * Kementerian Pekerjaan Umum (2013)

6.4. Pembahasan Campuran Beraspal Hangat Asbuton

1) Asbuton

- a. Kadar bitumen Asbuton LGA masuk Tipe B 50/30 namun memiliki nilai penetrasi tinggi (105,6 dmm) dan titik nyala lebih rendah ($190\text{ }^{\circ}\text{C} < 232\text{ }^{\circ}\text{C}$). Nilai penetrasi bitumen hasil TFOT mengalami penurunan cukup signifikan (sekitar 2,5 kali dari nilai semula atau 40 dmm) tendensi masih mengandung minyak ringan yang relatif masih tinggi (sekitar 2,882%)
- b. Ukuran mineral Asbuton LGA hasil ekstraksi sangat halus dan yang lolos saringan No. 200 sebanyak 49,47%. Untuk itu, proporsi penggunaannya kemungkinan tidak dapat banyak karena batasan spesifikasi agregat yang lolos saringan No. 200 umumnya maksimum 10%.
- c. Hasil pengujian DSR, bitumen Asbuton yang digunakan memiliki temperatur tinggi kritis $\{T_{C(T)}\}$ sebesar $68,56\text{ }^{\circ}\text{C}$ dan temperatur menengah kritis $\{T_{C(M)}\}$ sebesar $68,56\text{ }^{\circ}\text{C}$. Berdasarkan temperatur tinggi dan menengah kritis maka bitumen Asbuton yang digunakan masuk PG 64(22).

2) Bahan peremaja hangat

Peremaja hangat yang digunakan untuk campuran beraspal hangat dengan asbuton adalah SC-1000 dan SC-3000.

Sifat peremaja hangat SC-1000 memenuhi persyaratan dan temperatur pencampuran antara $120\text{ }^{\circ}\text{C}$ - $126\text{ }^{\circ}\text{C}$ serta temperatur pemadatan antara $109\text{ }^{\circ}\text{C}$ - $115\text{ }^{\circ}\text{C}$. Sedangkan sifat peremaja hangat SC-3000 memenuhi persyaratan sesuai ASTM D2016/D2026M dan temperatur pencampuran $118\text{ }^{\circ}\text{C}$ - $133\text{ }^{\circ}\text{C}$ dan untuk pemadatan $108\text{ }^{\circ}\text{C}$ - $117\text{ }^{\circ}\text{C}$.

3) Sifat campuran beraspal hangat Asbuton

- a. Sifat campuran beraspal hangat dengan peremaja hangat SC-1000 yang menggunakan variasi gradasi dan variasi proporsi Asbuton seluruhnya tidak memenuhi persyaratan. Hal tersebut pengaruh tingginya nilai penetrasi ($>100\text{ dmm}$) yang digunakan. Berdasarkan data tersebut maka penggunaan peremaja hangat untuk asbuton dengan penetrasi bitumen tinggi tidak relevan menggunakan SC-1000 dengan bahan pelunak solar.

- b. Penggunaan peremaja hangat 3 tipe SC-3000 pada campuran beraspal hangat dengan menggunakan LGA sebanyak 5% dan 10% serta dengan metoda pencampuran basah, diperoleh sifat volumetrik campuran serta stabilitas dan pelelehan yang memenuhi persyaratan. Namun untuk campuran beraspal hangat dengan 10% asbuton dan menggunakan peremaja hangat dengan jenis dan komposisi 89% aspal Pen 60-70 + 6% Oli SAE-10 + 50% Solar dan 89% aspal Pen 60-70 + 6% Minyak Goreng + 5% Solar, nilai stabilitas sisanya sedikit lebih rendah dari yang disyaratkan. Untuk itu penggunaan peremaja hangat dengan ketiga tipe SC-3000 untuk asbuton dengan penetrasi bitumen tinggi relevan digunakan.

7. PENUTUP

Berdasarkan hasil kajian sekala di laboratorium diperoleh bahwa untuk mengatasi kendala keterbatasan aspal dan agregat baru, khususnya untuk pekerjaan pemeliharaan (perbaikan atau rekonstruksi) jalan dengan menggunakan metode *cut and fill*, dapat dengan pemanfaatan RAP. Adapun untuk proporsi penggunaan RAP dapat lebih banyak atau di atas 10% maka aspal kerasnya harus menggunakan aditif peremaja.

Upaya lain untuk mengatasi kendala keterbatasan aspal yang setiap tahunnya selalu import adalah dengan mengoptimalkan penggunaan asbuton dengan teknologi campuran beraspal hangat dengan menggunakan peremaja hangat tipe SC 3000.

DAFTAR PUSTAKA

- American Association of State Highway Transportation Officials Standard. 2012. *Standard Specification for Performance-Graded Asphalt Binder* (AASHTO M320-12). Washington, D.C.
- American Association of State Highway Transportation Officials Standard. 2014. *Standard Method of Test Determining the Fatigue Life of Compacted Asphalt Mixtures Subjected to Repeated Flexural Bending* (AASHTO T 321-14). Washington, D.C.
- American Association of State Highway Transportation Officials Standard. 2012. *Standard Specification for Superpave Volumetric Mix Design* (AASHTO M323-12). Washington, D.C.
- Dairi, G. 1992. *Review Pemanfaatan Asbuton sebagai Bahan Perkerasan Jalan, (Review of Asbuton as Roads materilas)* Reserach Report. Bandung: Institute of Road Engineering
- Dony, A., Colin, J., Bruneau, D., Drouadaine, I., & Navaro, J. 2012. Reclaimed asphalt concretes with high recycling rates: *Changes in reclaimed binder properties according to rejuvenating agent*. Elsevier, 175-181.
- Kementerian Pekerjaan Umum. 2013. *Surat Edaran Menteri Pekerjaan Umum No. 10/SE/M/2013 Tentang Pedoman Spesifikasi Teknis Campuran Beraspal Dengan Asbuton*. Jakarta
- Direktorat Jenderal Bina Marga. 2014. *Spesifikasi Umum Bidang Jalan dan Jembatan Tahun 2010 Revisi 3*. Jakarta
- Kusnianti, Neni. 2002. *Laboratory evaluation of Lawele Buton Natural Asphalt*. Master thesis Institut Teknologi Bandung
- Lehtimaki, H. 2012. *Rejuvenating RAP with light oil products and a new mixing method for hot in-plant recycling*. In Via 2012 Congress. Espoo: Aalto University.
- Novita, P., Subagio, B. S., & Rahman, H. 2011. Kinerja Kelelahan Campuran Beton Aspal. *Jurnal Transportasi*, 11.
- O'Sullivan, K. A. 2011. *Rejuvenation of Reclaimed Asphalt Pavement (RAP) in Hot Mix Asphalt Recycling with High RAP Content*. Worcester: Worcester Polytechnic Institute.
- Qiu, J., Schlangen, E., van de Ven, M. F., & Shirazi, M. 2013. *Reintroducing The Intrinsic Self-Healing Properties In Reclaimed Asphalt by Rejuvenation*. Proceeding of the 4th International Conference on Self-Healing

- Materials (hal. 16-20). Ghent: Ghent University Dony, A., Colin, J., Bruneau, D., Drouadaine, I., & Navaro, J. (2012). Reclaimed asphalt concretes with high recycling rates: Changes in reclaimed binder properties according to rejuvenating agent. *Elsevier*, 175-181.
- Suaryana, N. 2008. *Laporan uji coba daur ulang perkerasan beraspal di Jalan Pantura* (lokasi Losari). Pusat Litbang Jalan. Bandung
- Sony 2015 (2). *Pemerintah Terus Upayakan Perbaikan Jalan Yang Rusak*. Diambil kembali dari www.pu.go.id: <http://www1.pu.go.id/uploads/berita/ppw080606sn.htm>
- Sumantri, B., Santiko, H., Djakfar, L., & Bowoputro, H. (2014). *Pengaruh Peremaja Oli Bekas dan Solar Terhadap Karakteristik Marshall Perkerasan Daur Ulang Dengan Asbuton*. Jurnal Mahasiswa Jurusan Teknik Sipil, 235.
- The Asphalt Institute's. 1993. *Mix Design Methods for Asphalt Concrete and Others Hot Mix Types*, Manual Series No. 2. Second Edition, USA
- Wirtgen. 2004. *Cold Recycling Manual 2th Edition*. Germany
- Yu, X., Zaumanis, M., Santos, S. d., & Poulidakos, L. D. 2014. *Rheological, microscopic, and chemical characterization of the rejuvenating on asphalt binders*. *Elsiviers*, 162-171

FOTO BAHAN COVER



