



Pengaruh Penambahan Aspal Emulsi Pada Lapis Pondasi Hasil Daur Ulang Dengan Semen (CTRB) Terhadap Kinerja Struktural Perkerasan Lentur

***Eri Susanto Hariyadi, Mutiara Mahardika**

Fakultas Teknik Sipil dan Lingkungan, Institut Teknologi Bandung

^{*}erish@itb.ac.id

Received: 7 Mei 2025 Revised: 23 Juli 2025 Accepted: 25 Juli 2025

Abstract

The scarcity of natural materials that meet specifications for road rehabilitation has encouraged the utilization of recycled pavement materials, particularly cement-treated recycled base (CTRB). Despite its widespread use, CTRB is susceptible to shrinkage cracking, which can lead to reflective cracking in the surface layer and reduce pavement service life. This study investigates the performance of CTRB and a modified mixture incorporating emulsified asphalt—designated as IRBCAE (In-place Recycling with Cement and Asphalt Emulsion)—to mitigate shrinkage-induced cracking. Both mixtures were prepared using recycled aggregates containing 5.34% residual asphalt, with a composition of 49% surface course and 51% base course aggregates. Resilient modulus testing was conducted to evaluate mechanical behavior, and pavement structural responses were analyzed using KENPAVE software. The results indicate that IRBCAE exhibits viscoelastic characteristics with superior fatigue cracking resistance, whereas CTRB demonstrates higher stiffness and greater resistance to permanent deformation. In practical application, CTRB requires a thicker asphalt overlay to prevent reflective cracking, while IRBCAE enables the use of a thinner asphalt layer. The differences in structural performance between the two mixtures provide a basis for selecting suitable stabilization methods for recycled base layers.

Keywords: Bitumen Emulsion, CTRB, IRBCAE, Reclaimed Asphalt Pavement

Abstrak

Keterbatasan bahan alam untuk perbaikan jalan mendorong pemanfaatan material daur ulang, termasuk campuran perkerasan daur ulang yang distabilisasi semen (CTRB). Namun, CTRB memiliki kelemahan berupa kerentanan terhadap retak susut yang dapat memicu retak reflektif pada lapisan permukaan. Penelitian ini mengevaluasi kinerja CTRB dan campuran serupa yang ditambahkan aspal emulsi (IRBCAE-In-place Recycling with Cement and Asphalt Emulsion) untuk mengurangi potensi retak susut. Kedua campuran dirancang menggunakan agregat daur ulang dengan kadar aspal sisa sebesar 5,34%, serta komposisi agregat lapis permukaan dan fondasi masing-masing 49% dan 51%. Pengujian modulus resiliens dilakukan untuk menilai kinerja mekanis, sedangkan analisis respons struktural dilakukan melalui pemodelan menggunakan perangkat lunak KENPAVE. Hasil menunjukkan bahwa IRBCAE bersifat viskoelastis dengan ketahanan retak lelah yang lebih baik, sedangkan CTRB lebih kaku dan unggul dalam menahan deformasi permanen. Dalam penerapannya, CTRB memerlukan lapisan aspal yang lebih tebal untuk mencegah retak reflektif, sedangkan IRBCAE memungkinkan penggunaan lapisan yang lebih tipis. Perbedaan kinerja struktural antara kedua campuran tersebut dapat menjadi pertimbangan dalam memilih metode stabilisasi lapis pondasi daur ulang.

Kata kunci: Aspal Emulsi, CTRB, IRBCAE, Daur Ulang Perkerasan Beraspal

Pendahuluan

Infrastruktur jalan memiliki peran yang sangat penting sebagai sarana penunjang pertumbuhan ekonomi serta pemenuhan kebutuhan sosial

masyarakat. Peningkatan jumlah penduduk secara langsung berdampak pada meningkatnya kebutuhan terhadap infrastruktur jalan yang tidak hanya harus tersedia, tetapi juga mampu melayani beban mobilitas dengan aman dan nyaman. Oleh karena

itu, peningkatan kondisi jalan secara rutin menjadi hal yang mutlak diperlukan. Salah satu bentuk peningkatan tersebut adalah melalui penambahan atau penggantian lapis perkerasan, yang membutuhkan biaya besar dan volume material yang signifikan. Namun, ketersediaan material yang memenuhi spesifikasi teknis semakin terbatas (Suaryana, 2012).

Beberapa penelitian dilakukan untuk mencari alternatif material yang memenuhi persyaratan dari material yang tersedia bahkan dari yang terbuang, salah satunya adalah penggunaan material daur ulang. Penggunaan material daur ulang mendukung konsep keberlanjutan jika penggunaan material daur ulang ini memiliki kualitas yang sama bahkan lebih baik dari material asli dengan biaya yang lebih murah sekaligus memberi dampak yang lebih baik pada lingkungan seperti mengurangi pembuangan sampah, polusi dan emisi (Rahman *et al.*, 2020). Material daur ulang perkerasan lama dianggap sebagai agregat biasa walaupun masih memiliki kandungan aspal yang sudah *aging*. Kandungan aspal tersebut tidak diaktifasi kembali karena tidak dilakukan proses *preheating* sehingga masih memiliki potensi *aging* cukup tinggi untuk menyebabkan peningkatan rongga udara hingga ikatan campuran mudah lepas dan pecah serta pada akhirnya dapat menurunkan kinerjanya untuk menahan beban (Meng & Liu, 2020).

Salah satu alternatif penggunaan material daur ulang dengan stabilisasi semen yang sudah dikembangkan di Indonesia adalah CTRB (*Cement Treated Recycled Base*). Campuran dengan semen umumnya akan memiliki kekuatan *fatigue* dan *bearing capacity* yang lebih tinggi dibandingkan dengan *unbound materials* (Chakravarthi & Shankar, 2021) namun peningkatan tersebut menyebabkan retak susut yang dapat menimbulkan retak reflektif pada permukaan aspal (Dolzycki *et al.*, 2017) sehingga menurunkan kapasitas struktural dan memperpendek umur layan jalan (Zhao *et al.*, 2021). Untuk mengurangi dampak tersebut, perlu penambahan bahan yang bersifat elastis sebagai upaya menambah kapasitas regangan dalam mengimbangi efek susut.

Aspal emulsi merupakan salah satu material elastis yang ramah lingkungan dan efisien secara ekonomi, sehingga menjadi pilihan dalam kegiatan peningkatan perkerasan. Penambahan aspal emulsi secara signifikan meningkatkan kohesi campuran dan memperkenalkan sifat viskoelastis yang terdistribusi pada partikel halus. Sementara itu, agregat kasar yang tidak sepenuhnya terlapisi tetap mempertahankan karakteristik *stress-dependent*, sehingga memberikan ketahanan yang baik terhadap retak akibat tegangan tarik (Asphalt

Academy, 2009) sehingga kombinasi aspal emulsi dan semen berpotensi meningkatkan daya tahan terhadap *fatigue*, kekuatan, serta fleksibilitas campuran (Nanthavisit *et al.*, 2019).

Campuran dengan semen selanjutnya disebut CTRB dan campuran dengan semen dan aspal emulsi disebut IRBCAE (*In-place Recycling with Cement and Asphalt Emulsion*). Komposisi campuran lapis pondasi tersebut tergantung dari karakteristik material penyusun dan kebutuhan desain yang diinginkan sehingga membutuhkan proses percobaan pencampuran. Kandungan air dalam campuran pun menjadi hal yang perlu diperhatikan karena dapat mempengaruhi kepadatan kering campuran (Kasu *et al.*, 2020). Bahan stabilisasi yang digunakan merupakan bahan yang peka terhadap suhu, sehingga kadar dan proses *curing* menjadi hal yang diperhatikan.

Proses *curing* ditandai dengan mulai mengerasnya aspal emulsi dan terhidrasinya semen yang mengakibatkan perubahan struktur fisik dan meningkatnya sifat mekanis (Cardone *et al.*, 2015; Du, 2018; Graziani *et al.*, 2016; Mignini *et al.*, 2018). Campuran semen dan aspal emulsi memiliki rongga udara yang lebih besar dan proses *curing* yang lebih lama sehingga dapat mengurangi daya tahan dan kinerja mekanisnya sehingga kandungannya perlu dibatasi (Mignini *et al.*, 2018). Dalam penelitian ini, campuran CTRB dan IRBCAE menggunakan komposisi agregat daur ulang yang sama. Perbedaan keduanya terletak pada komposisi bahan stabilisasi yang ditambahkan. Penambahan aspal emulsi dihitung menggunakan pendekatan kuantitatif berdasarkan persentase ukuran agregat dan campuran lapis beraspal. Penambahan semen didapat berdasarkan hasil percobaan untuk mendapat nilai maksimum karakteristik yang disyaratkan.

Studi ini membandingkan dua campuran tersebut dengan pembuatan banyak sampel pengujian kepadatan dan kekuatan untuk mendapatkan kadar air optimum dan bahan stabilisasi. Dengan kadar optimum tersebut, dibuat benda uji untuk menguji modulus resilien yang dibutuhkan sebagai input dalam pemodelan struktur perkerasan. Modulus resilien merupakan parameter ideal untuk menggambarkan perilaku tegangan-regangan campuran berbutir dengan model pembebanan lalu lintas (Corradini *et al.*, 2021a). Penelitian ini dimaksudkan untuk mengevaluasi kebermanfaatan bahan daur ulang sebagai lapis pondasi atas dengan penambahan aspal emulsi pada campuran untuk lapis pondasi bahan daur ulang CTRB serta menganalisis pengaruh bahan tambah tersebut terhadap kapasitas struktur perkerasan lentur sehingga pada akhirnya diharapkan dapat menjadi

referensi pemilihan alternatif pemanfaatan bahan daur ulang sebagai *wasted material* menjadi material yang berkualitas sehingga dapat menekan kebutuhan agregat alam baru.

Metodologi Penelitian

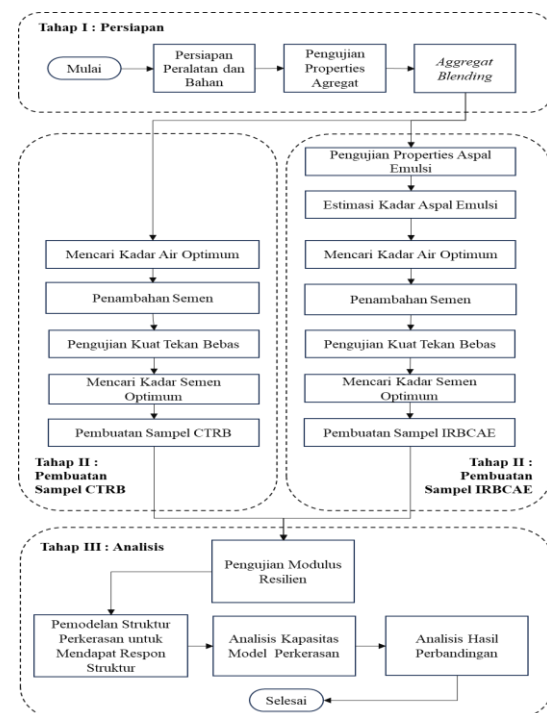
Metode daur ulang di tempat merupakan teknik konstruksi yang memanfaatkan sebagian perkerasan eksisting sebagai material untuk membentuk lapis pondasi baru secara langsung di lokasi. Proses ini melibatkan penghancuran campuran aspal eksisting, pencampurannya dengan bahan stabilisasi seperti semen, aspal emulsi, serta material lapis pondasi agregat yang ada, kemudian dipadatkan untuk menghasilkan lapis pondasi stabilisasi yang baru. Mengingat pentingnya kondisi awal material, diperlukan survei menyeluruh terhadap perkerasan dan tanah dasar eksisting guna memahami kondisi aktual di lapangan. Dalam perancangannya, tidak hanya lapis pondasi hasil daur ulang yang perlu diperhitungkan, melainkan juga lapis permukaan, lapis bawah, dan sisa lapis pondasi agregat eksisting sebagai satu kesatuan sistem struktur perkerasan.

Metode penelitian yang digunakan mengambil referensi dari Spesifikasi Khusus Interim Lapis Pondasi Daur Ulang Perkerasan Eksisting dengan Aspal Emulsi dan Semen (SKh.1.5.26) dan Pd T-08-2005-B Pedoman Perencanaan Campuran Lapis Pondasi Hasil Daur Ulang Perkerasan Lama dengan Semen. Pengujian lain mengacu pada Spesifikasi Umum 2018 untuk Pekerjaan Konstruksi Jalan dan Jembatan (Revisi 2) dan standar pengujian di Indonesia lainnya. Tahap awal kegiatan dilakukan dengan pengamatan untuk mengidentifikasi kondisi perkerasan eksisting yang akan didaur ulang. Selanjutnya, dilakukan penentuan lokasi atau titik test pit guna mengetahui ketebalan masing-masing lapis perkerasan eksisting serta untuk mengambil sampel agregat dari setiap lapisan tersebut sebagai bahan uji dalam perancangan campuran di laboratorium.

Bahan daur ulang merupakan bahan atau agregat lapis perkerasan eksisting, yaitu lapis pondasi eksisting dengan atau tanpa agregat lapis permukaan beraspal eksisting. Bahan daur ulang lapis pondasi sulit untuk ditemukan sehingga bahan daur ulang yang dipakai adalah bahan lapis perkerasan permukaan eksisting saja dan karakter bahan lapis pondasi eksisting diasumsikan mendekati dengan bahan lapis pondasi baru. Bahan aspal emulsi yang digunakan adalah tipe pengerasan lambat untuk dapat memastikan campuran yang seragam dan kinerja yang baik setelah proses pengerasan bersama dengan semen, dipilih tipe *Cationic Slow-Setting* (CSS-1). Bahan semen

dimanfaatkan untuk meningkatkan kekakuan campuran tanpa persyaratan khusus lainnya, sehingga tipe semen yang digunakan adalah semen Tipe I atau *Portland Composite Cement* (PCC).

Berdasarkan alir metode penelitian pada Gambar 1, tahapan awal penelitian dimulai dari persiapan dan pengujian properties bahan serta agregat. Bahan daur ulang diambil dari hasil pekerjaan *cold milling* pada ruas Jalan Exit Toll Kanci sedalam 10 sentimeter yang diketahui merupakan lapis aus permukaan (*wearing course*). Bahan daur ulang disebut *reclaimed asphalt pavement* (RAP) memiliki berat isi 2,56 gr/cm³ dan berdasarkan hasil ekstraksi bahan memiliki kadar sisa aspal sebesar 5,34%. Dari hasil analisa saringan, RAP memiliki gradasi cenderung halus. Sedangkan pada umumnya, lapis pondasi membutuhkan butiran kasar yang lebih banyak. Begitupun dengan spesifikasi gradasi campuran CTB dan IRBCAE, sehingga agregat RAP tidak dapat digunakan tanpa campuran agregat lain. Bahan lapis pondasi diambil dari *quarry* di Tasikmalaya, Jawa Barat yang memiliki berat jenis sebesar 2,66 gr/cm³ dengan properties sesuai dengan Spesifikasi Bina Marga Tahun 2018 Revisi 2.

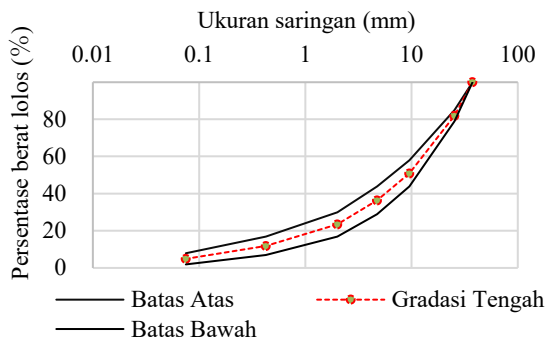


Gambar 1. Bagan alir metode penelitian

Dari asumsi bahwa tebal lapis pondasi yang akan didesain dengan menggunakan pondasi yang distabilisasi setebal 200 milimeter dengan memanfaatkan tebal RAP yang digaruk sedalam 100 milimeter dengan mempertimbangkan berat jenis masing-masing agregat didapat komposisi persentase agregat lapis permukaan eksisting dan

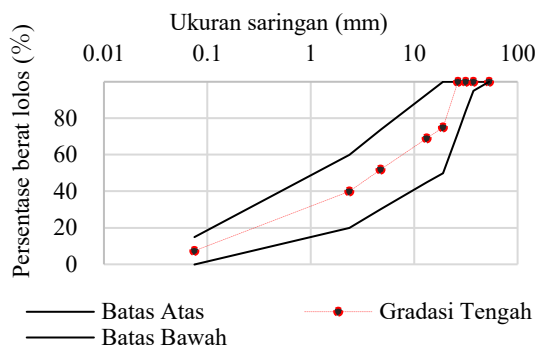
lapis pondasi sebesar 49% dan 51%.

Untuk menjamin campuran yang memiliki sifat penguncian antar agregat secara mekanis, komposisi pas antar fraksi agregat sehingga pemenuhan gradasi menjadi hal yang perlu dipastikan sebelum membuat desain rancangan campuran. Komposisi tersebut telah memperhitungkan kesesuaian gradasi campuran CTRB dan IRBCAE. Gradasi yang diambil adalah gradasi tengah untuk meminimalisir kemungkinan perubahan bentuk agregat sehingga keluar dari amplop gradasi (lihat Gambar 2 dan 3).



Sumber: (Departemen Pekerjaan Umum, 2005)

Gambar 2. Kurva gradasi campuran CTRB



Sumber: (Dirjen Bina Marga, 2024)

Gambar 3. Kurva gradasi campuran IRBCAE

Aspal emulsi menggunakan bahan dari PT. Asphalt Bangun Sarana dan telah memiliki properties sesuai Spesifikasi Umum 2018 untuk Pekerjaan Konstruksi Jalan dan Jembatan (Revisi 2) dan SNI 4798:2011 Spesifikasi Aspal Emulsi Kationik. Aspal emulsi memiliki kadar residu aspal emulsi sebesar 59,51% dari hasil pengujian residu penyulingan. Kadar aspal emulsi dihitung dengan Persamaan 1 dihasilkan sebesar 4,94% dari berat total campuran.

$$P = 0,04 a + 0,07 b + 0,12 c - 0,013 d \quad (1)$$

dengan a adalah % agregat yang tertahan saringan ukuran 2,36 mm, b adalah % agregat yang lolos saringan ukuran 2,36 mm tapi tertahan saringan ukuran 0,075 mm, c adalah % agregat yang lolos

saringan ukuran 0,075 mm, dan d adalah % agregat daur ulang.

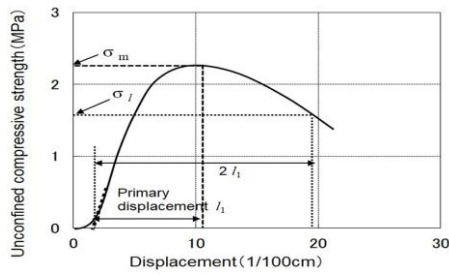
Semen yang digunakan memenuhi ketentuan SNI 7064:2022 dengan tipe PCC. Semen berfungsi sebagai pengisi rongga pada campuran sehingga berat isi campuran dapat meningkat seiring dengan berkurangnya rongga. Namun kadar semen berlebih pada campuran membuat terbentuknya terlalu banyak rongga akibat reaksi hidrasi semen yang menghasilkan panas dan menjebak udara di dalam campuran sehingga berat isi kering akan menurun. Setelah rancangan campuran dibuat, percobaan pemadatan harus dilakukan untuk mendapat kadar air optimum yang digunakan dalam desain campuran. Untuk mendapat campuran yang padat optimal, diperlukan percobaan mencari kadar air optimum. Variasi rancangan desain CTRB, dibuat rancangan campuran berkadar semen (3,5%, 5%, 6%, 7,5%) dengan variasi kenaikan kadar air. Banyaknya air yang ditambahkan merupakan persentase terhadap berat total agregat dimana penentuannya dilakukan berdasarkan kadar semen yang memenuhi kuat tekan bebas yang disyaratkan yaitu 1,5 – 3,0 MPa dari hasil pemadatan dengan metode Proctor sebanyak 56 tumbukan.

Kepadatan maksimum untuk campuran IRBCAE dicari dari percobaan benda uji dengan variasi kadar air (3%, 4%, 5%, 6%, 7%) pada sampel yang dipadatkan dengan *Marshall Compactor Machine* sebanyak 50 tumbukan pada setiap sisi. Banyaknya air yang ditambahkan merupakan persentase terhadap berat campuran agregat, semen, aspal emulsi yang telah dikurangi dengan kadar penyusun aspal emulsi selain bitumennya dengan menggunakan Persamaan 2.

$$W = \left\{ \left(A + C + E * \frac{R}{100} \right) * \frac{w}{100} \right\} - \left\{ E * \left(1 - \frac{R}{100} \right) \right\} \quad (2)$$

dengan W adalah massa air yang ditambahkan, A adalah massa agregat, C adalah massa semen, E adalah Massa aspal emulsi, w adalah % target kadar air, dan R adalah % kadar residu aspal emulsi.

Dengan menggunakan gradasi dan kadar air optimum, selanjutnya dibuat rancangan campuran lanjutan untuk mendapat kadar semen optimum sebagai fokus mencari karakteristik penilaian utama pada campuran CTRB dan IRBCAE. Pada campuran CTRB, penentuan kadar semen optimum dipilih berdasarkan nilai kuat tekan maksimum dan berat isi maksimum. pada campuran IRBCAE, kadar semen optimum ditentukan dengan mempertimbangkan kombinasi antara kuat tekan maksimum yang disyaratkan 1,5–2,9 MPa, regangan primer (*primary displacement*), dan kekuatan sisa (*residual strength*). Kadar semen optimum merupakan nilai tengah pada rentang nilai tersebut.



Sumber: (Yasutsugu & Kohei, 2022)

Gambar 4. Karakteristik utama campuran IRBCAE

Primary displacement merupakan regangan primer atau perubahan bentuk plastis hingga mencapai kekuatan maksimum struktur (lihat Gambar 4).. Batasan ini dibuat untuk menjamin besar defleksi tidak mempengaruhi defleksi pada lapis permukaan dan deformasi permanen pada lapis tanah dasar. Nilai *primary displacement* dilihat dari perpindahan dial gauge saat sampel pertama kali dibebani sampai mencapai kegagalan pada benda uji atau saat mencapai nilai kekuatan maksimum dan disyaratkan pada rentang 5–30 (1/100 cm). *Residual strength* merupakan kekuatan yang tersisa setelah deformasi terjadi.

Campuran IRBCAE mensyaratkan *residual strength* sebesar 65% untuk menjamin keselamatan pengguna jalan ketika strukturnya telah mengalami fraktur. Nilai *residual strength* dihitung dari persentase kuat tekan maksimum dihitung menggunakan Persamaan 3 yaitu saat mencapai regangan awal terhadap kuat tekan kegagalan benda uji saat mencapai regangan dua kali dari regangan awal (lihat Gambar 4).

$$RS (\%) = \frac{\sigma_l}{\sigma_m} * 100 \quad (3)$$

dengan *RS* adalah *residual strength percentage*, σ_l adalah kuat tekan saat mencapai $2l_1$, σ_m kuat tekan saat mencapai l_1 , dan l_1 merupakan regangan primernya.

Rancangan campuran final menggunakan bahan-bahan dengan kadar optimum dibuat sampel untuk pengujian modulus resiliens menggunakan alat *Dynamic Test System*. Pada setiap campuran dengan komposisi optimum dibuat 4 (empat) buah benda uji untuk dikondisikan sesuai dengan kondisi campuran di lapangan, pengujian dilakukan pada rentang suhu 25°C dan 35°C.

Pada pengujian tersebut, data yang diinput berupa dimensi sampel dan *poisson's ratio*. Dengan nilai modulus resiliens yang didapat dari masing-masing campuran, dibuat model struktur perkerasan menggunakan referensi input data dari Manual Desain Perkerasan 2024. Model dibuat

menggunakan KENPAVE untuk menghasilkan respon struktur berupa nilai regangan sebagai paramater analisis kinerja perkerasan. Analisis menggunakan hubungan nilai regangan dengan kumulatif repetisi beban lalu lintas sebagai model kinerja struktural dimana deformasi permanen dan retak lelah menjadi parameternya. Satuan beban yang dimodelkan merupakan beban standar sebesar 750 KPa dengan konfigurasi kendaraan sumbu tunggal roda ganda.

Respon struktur perkerasan akibat beban kendaraan diambil dari titik lokasi kritis dimana regangan horizontal maksimum terjadi di bawah lapis permukaan aspal (*tensile strain at bottom of asphalt*) dan regangan vertikal maksimum terjadi di atas lapis tanah dasar (*compressive strain at top of subgrade*). *Allowable load repetition* atau repetisi beban yang diizinkan struktural merupakan hasil perhitungan dengan persamaan dari Manual Desain Perkerasan 2024 yang menunjukkan kapasitas pekerasan terhadap beban yang berkerja di atasnya. Model yang menghubungkan respon struktur terhadap beban dengan kinerja perkerasan berupa retak lelah dan deformasi permanen. Retak lelah lapis beraspal memiliki hubungan batasan regangan lapis beraspal dengan kumulatif repetisi beban sebagai kriteria retak lelah dengan Persamaan 4.

$$Nf = \frac{SF}{RF} \left[\frac{6918 * (0,856 Vb + 1,08)}{E_{mix}^{0,36} * \mu \epsilon} \right]^5 \quad (4)$$

dengan *Nf* adalah jumlah repetisi izin beban akibat kelelahan; $\mu \epsilon$ merupakan regangan tarik horizontal akibat beban dengan satuan microstrain; *Sf* adalah *Shift factor* antara hasil pengujian laboratorium dan *in-service fatigue lives* (nilai presuntif = 6); *RF* adalah faktor reabilitas pada 90% sebesar 3,9; *Vb* adalah % volume aspal dalam campuran; dan E_{mix} adalah modulus campuran aspal (MPa).

Retak lelah lapis dengan semen memiliki hubungan batasan regangan dengan kumulatif repetisi beban sebagai kriteria retak lelah dinyatakan dalam Persamaan 5. Respon struktur perkerasan terhadap beban lalu lintas tidak seluruhnya bersifat elastis (*recoverable*), sebagian akan bersifat plastis (*unrecoverable*). Bentuk kerusakan akibat respon plastis ini menciptakan akumulasi regangan pada tanah dasar yang disebut deformasi permanen. Hubungan batasan regangan tanah dasar dengan kumulatif repetisi beban sebagai kriteria deformasi permanen dirumuskan dengan Persamaan 6.

$$Nf = RF \left(\frac{K}{\mu \epsilon} \right)^{12} \quad (5)$$

dengan *Nf* adalah jumlah repetisi izin beban akibat kelelahan; $\mu \epsilon$ merupakan regangan tarik horizontal akibat beban dengan satuan microstrain; *RF* adalah faktor reabilitas pada 90% sebesar 2,0; dan *K* adalah *presumptive fatigue constant* yang dalam modulus

ini dipakai 234,3.

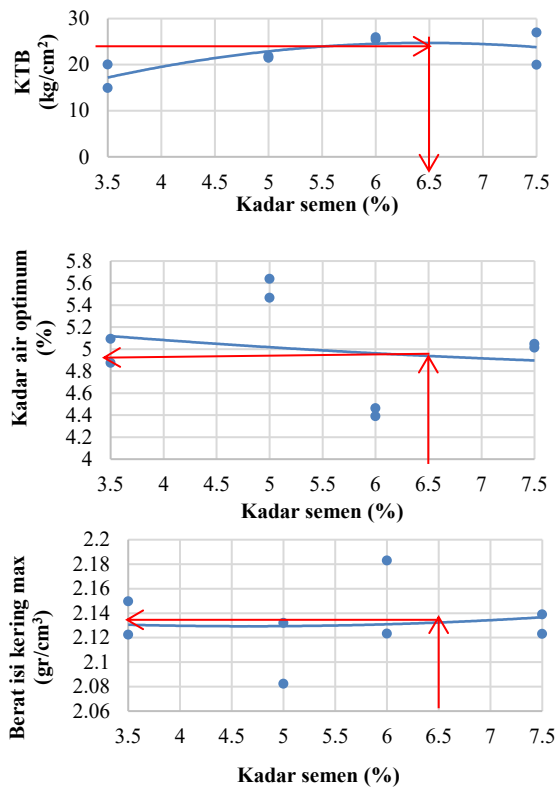
$$Nd = RF \left[\frac{9300}{\mu\epsilon} \right]^7 \quad (6)$$

dengan Nd adalah jumlah repetisi izin beban, RF adalah Faktor rehabilitas pada 90% sebesar 2 dan $\mu\epsilon$ merupakan regangan tarik vertikal akibat beban dengan satuan *microstrain*.

Hasil dan Pembahasan

Rancangan desain campuran CTRB

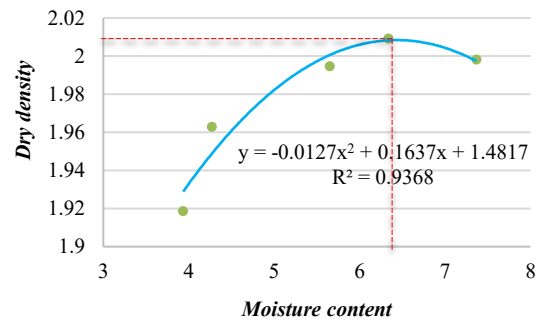
Pemilihan kadar semen campuran melalui pemilihan kuat tekan bebas yang memenuhi nilai kuat tekan bebas sesuai spesifikasi. Dengan kadar semen terpilih, digambarkan pada grafik hubungan dengan kadar air optimum untuk menentukan kadar air optimum terpilih. Kadar semen terpilih dihubungkan dalam berat isi kering maksimum untuk mendapat kepadatan kering maksimum campuran. Gambar 5 menunjukkan bahwa kadar semen optimum sebesar 6,5%, kadar air optimum sebesar 4,94%, dan berat isi kering maksimum sebesar 2,135 gr/cm³.



Gambar 5. Grafik pemilihan kadar semen optimum, kadar air optimum, dan berat isi kering maksimum campuran CTRB Rancangan desain campuran IRBCAE

Dari hasil percobaan pemadatan, didapat kadar air optimum yang menghasilkan kepadatan kering

maksimum sebesar 2,009 gr/cm³ adalah 6,45% (Gambar 6). Kadar air pada campuran IRBCAE lebih tinggi dari campuran CTRB karena komponen air pada campuran IRBCAE diperlukan untuk melakukan ikatan hidrolis membentuk senyawa kristal dan mengeras, menjadi pelumas dalam proses pemadatan, dan mendispersikan bitumen dan pasta ke agregat kasar sebelum mencapai *break phase*. Kadar air yang terlalu sedikit menyebabkan aspal emulsi pecah lebih cepat, sedangkan kadar air yang terlalu banyak mengharuskan penguapan terjadi sebelum pemadatan.

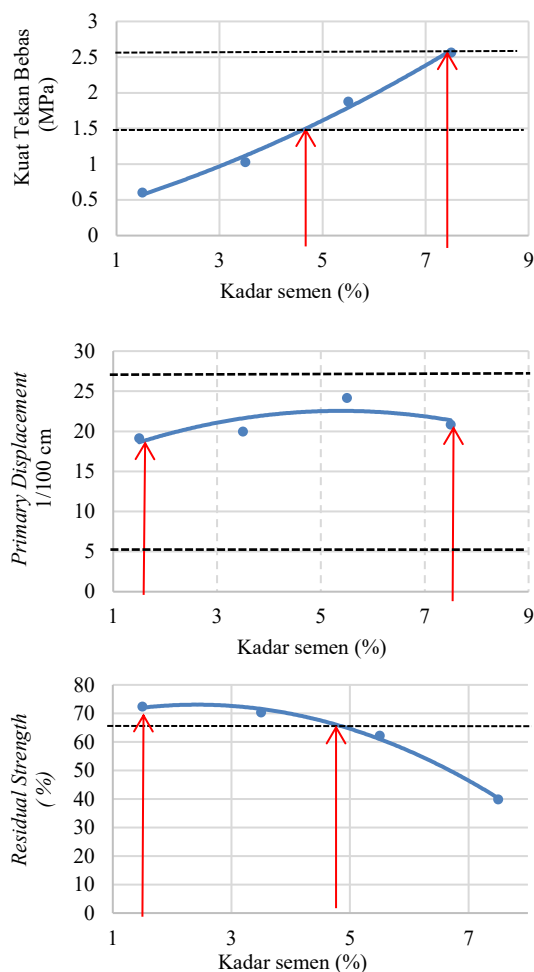


Gambar 6. Variasi kadar semen dan kadar air terhadap berat isi kering campuran IRBCAE

Dari formula campuran dengan kadar air optimum, dibuat rancangan campuran kembali untuk mendapat *characteristic value* (*compressive strength*, *primary displacement*, dan *residual strength percentage*) dari ragam variasi kadar semen. Pada Gambar 7 tampak bahwa rentang kadar semen yang masuk hanya pada 4,75 - 4,8%. Kadar semen berpengaruh pada peningkatan kuat tekan bebasnya dan berbanding terbalik dengan persentase kekuatan sisanya. Meningkatnya kadar semen menghasilkan peningkatan kerapatan campuran sehingga menaikkan kekuatannya namun mempercepat proses hidrasi dan evaporasi sebagai pemicu terjadinya retakan yang akhirnya dengan cepat menurunkan kekuatan campuran (LeBow, 2018). Struktur dengan kekuatan sisa lebih tinggi dianggap lebih aman karena masih bisa menahan beban walaupun telah mengalami kegagalan (Diyanti *et al.*, 2024).

Campuran perkerasan yang distabilisasi dengan semen dan aspal emulsi pada umumnya mengandung 1- 2% semen. Campuran dengan kadar semen lebih tinggi dapat diterima jika campuran didominasi dengan pengikat bitumen dibanding dengan pengikat hidrolisnya (Dolżycki & Jaskuła, 2019). Jika kadar semen melebihi kadar aspal emulsinya akan berdampak pada menurunnya persentase kekuatan sisa sehingga tidak memenuhi persyaratan campuran. Campuran IRBCAE dengan kadar semen lebih tinggi tersebut menyebabkan campuran terlalu kaku. Sehingga, campuran berperilaku seperti campuran bersemen dan

kehilangan sifat kelenturan yang menyebabkan tidak mudah retak saat mengalami tegangan tarik (Asphalt Academy, 2009).



Gambar 7. Diagram penentuan kadar semen optimum berdasarkan karakteristik utama campuran IRBCAE

Pengujian modulus resilien

Modulus resilien merupakan parameter ideal untuk menggambarkan perilaku tegangan-regangan campuran berbutir dengan model pembebanan lalu lintas (Corradini *et al.*, 2021). Modulus resilien dipengaruhi oleh banyak faktor, seperti properties material, temperatur pengujian, dimensi benda uji, dan pembebanan pengujian. Hasil pengujian disampaikan dalam Tabel 1, dimana campuran IRBCAE menunjukkan penurunan nilai modulus resilien pada peningkatan suhu, dan perilaku campuran terhadap suhu berbanding terbalik pada campuran CTRB. Penurunan modulus resilien pada campuran IRBCAE ini mencapai 74,68% dan peningkatan modulus pada campuran CTRB mencapai 19,05%.

Hal ini dijelaskan karena pada temperatur tinggi,

vibrasi atom meningkat, membuat molekul penyusun material mengembang dan saling bertumbukan yang menyebabkan peningkatan volume rongga antar penyusun material (Galan *et al.*, 2020). *Loading duration* juga berpengaruh terhadap nilai modulus resilien pada campuran dengan karakteristik viskoelastik yang sebaiknya diuji dengan nilai 100-300 ms (Junaid *et al.*, 2022). Pengujian modulus resilien ini dilakukan dengan *loading pulse* sebesar 250 ms.

Tabel 1. Hasil pengujian modulus resilien

Jenis campuran	Modulus resilien			
	25°C		35°C	
	Sampel 1	Sampel 2	Sampel 1	Sampel 2
CTRB	3743	4157	5014	4391
IRBCAE	190	205	29	71

Pada campuran dengan kandungan bitumen, temperatur memiliki pengaruh yang cukup signifikan dimana semakin tinggi temperatur menyebabkan campuran memiliki kekakuan yang lebih rendah. Hal ini disebabkan karena pada suhu tinggi, bitumen akan mencair dan keluar dari rongga agregat sehingga campuran menjadi lentur (Adithya *et al.*, 2016). Campuran dengan kandungan semen akan bertambah kaku seiring peningkatan temperatur, karena proses hidrasi menjadi lebih cepat sehingga kekakuan cepat tercapai.

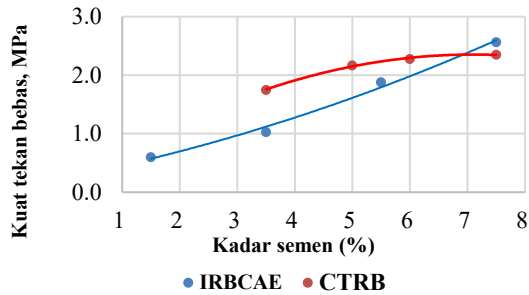
Analisis kinerja campuran

Unconfined compression strength digunakan sebagai parameter kekuatan benda uji maksimum terhadap tekanan aksial tanpa pengaruh tekanan lateral. Pada campuran IRBCAE, nilai kuat tekan bebas semakin besar ketika kadar semen semakin besar, regangan meningkat hingga mencapai kadar semen optimum dan kembali menurun ketika kadar semen ditingkatkan. Semakin besar kadar semen, semakin kecil kekuatan sisa dari campuran (kekuatan sisa setelah mencapai kekuatan maksimumnya).

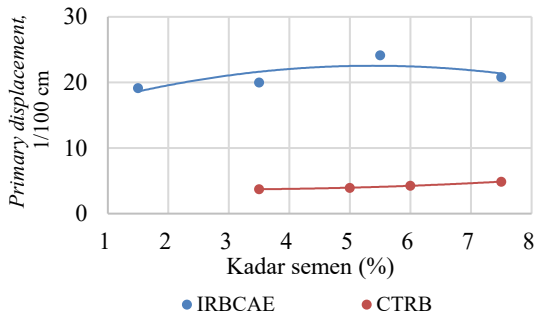
Peningkatan kadar semen membuat kerapatan campuran meningkat, modulus elastis meningkat, kekuatan meningkat dan nilai regangan berkurang. Nilai kuat tekan bebas yang memenuhi nilai standar adalah campuran dengan kadar semen lebih dari 3,5%. Ditinjau dari karakter utama campuran, hasil pengujian menunjukkan bahwa dengan kadar semen yang sama campuran CTRB memiliki nilai kuat tekan bebas lebih besar dari campuran IRBCAE (lihat Gambar 8).

Pada campuran IRBCAE dengan kandungan bitumen didalamnya, 166 dimana bitumen dianggap memiliki sifat hidrofobik yang secara kimiawi

berlawanan dengan sifat hidrofilik seperti semen, zona transisi yang terbentuk akibat perbedaan sifat antara permukaan pasta semen dan bitumen menyebabkan adanya perlemahan tersebut (Kasu *et al.*, 2020). Selain itu, pada campuran CTRB memiliki butiran lebih besar sehingga berdampak cukup signifikan pada kekuatan.



Gambar 8 Perbandingan kuat tekan bebas campuran CTRB dan IRBCAE



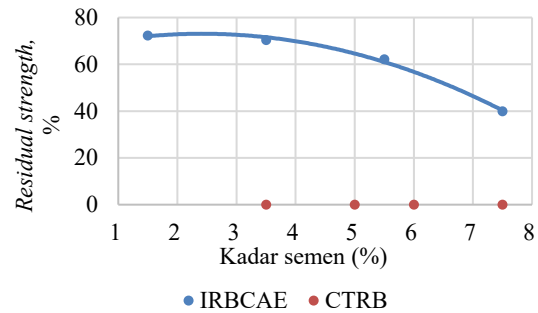
Gambar 9 Perbandingan regangan primer campuran CTRB dan IRBCAE

Primary displacement atau regangan primer campuran CTRB lebih kecil dari campuran IRBCAE karena sifat kakunya (lihat Gambar 9). Kekakuan merupakan kemampuan material untuk menahan deformasi; semakin tinggi tingkat kekakuan suatu material, semakin besar kemampuannya untuk menahan defleksi akibat pembebanan. Kehadiran bitumen berdampak pada kekakuan, defleksi awal terjadi lebih besar.

Banyaknya semen mengubah material menjadi lebih kaku dari kekuatan kohesi dan akan berkurang secara signifikan setelah terjadinya deformasi (Asphalt Academy, 2009). Hal ini yang menyebabkan regangan pada campuran CTRB lebih kecil dibanding dengan regangan IRBCAE yang memiliki fleksibilitas dari bitumen.

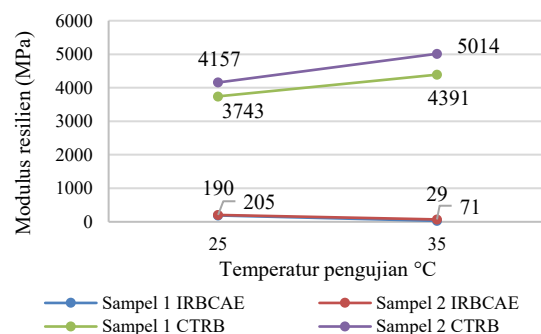
Kekuatan sisa campuran CTRB lebih kecil dibandingkan dengan campuran IRBCAE (lihat Gambar 10). Sifat fleksibel pada campuran IRBCAE berkontribusi terhadap penyebaran tegangan secara lebih merata saat menerima beban, sehingga mengurangi risiko konsentrasi tegangan

yang dapat memicu retak. Ketika terjadi retak, campuran ini masih mampu mempertahankan sebagian kekuatannya karena adanya tegangan tarik residu. Sebaliknya, campuran CTRB yang bersifat kaku menunjukkan penurunan kekuatan yang signifikan saat mengalami retak, akibat tidak adanya kemampuan untuk menahan tegangan tarik setelah batas elastis terlampaui. Hal ini menjadikan CTRB lebih rentan terhadap propagasi retak dan kerusakan struktural lanjutan.

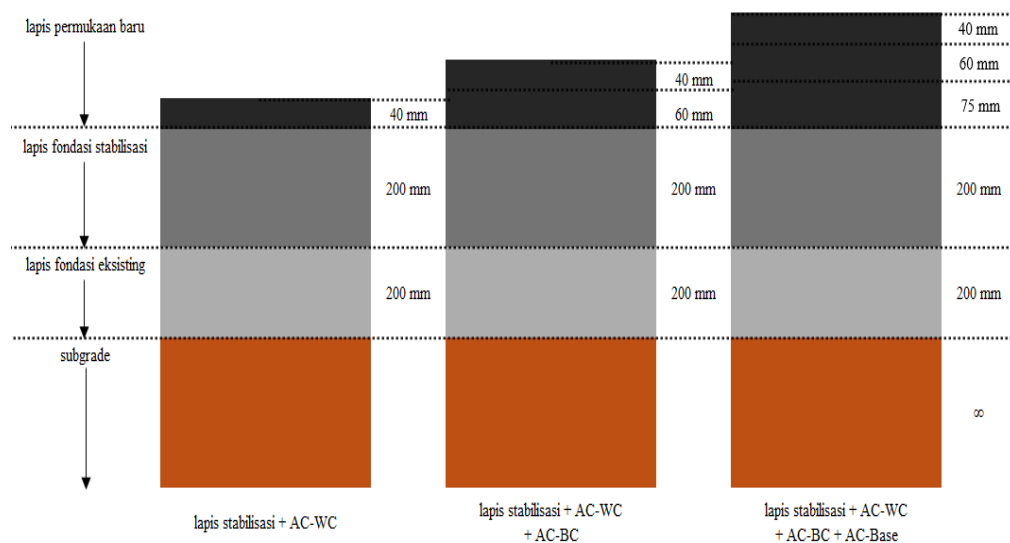


Gambar 10 Perbandingan persentase kekuatan sisa campuran CTRB dan IRBCAE

Dengan begitu, campuran IRBCAE memiliki ketahanan lebih baik. Struktur dengan kekuatan sisa lebih tinggi dianggap lebih aman karena masih bisa menahan beban walaupun telah mengalami kegagalan (Diyanti *et al.*, 2024). Hasil pengujian modulus resilien menunjukkan adanya selisih yang cukup signifikan antara kedua jenis campuran (lihat Gambar 11). Campuran CTRB menunjukkan nilai modulus resilien yang jauh lebih tinggi dibandingkan IRBCAE, yang mengindikasikan tingkat kekakuan yang lebih besar. Semakin tinggi nilai modulus, semakin kaku material tersebut dalam menahan deformasi akibat pembebanan. Kekakuan CTRB ini berasal dari kandungan semen yang membentuk ikatan langsung antarpartikel agregat, menghasilkan struktur internal yang lebih padat dan kuat. Sebaliknya, nilai modulus yang lebih rendah pada IRBCAE mencerminkan sifat fleksibel dari campuran tersebut yang dipengaruhi oleh keberadaan aspal emulsi.



Gambar 11. Hasil pengujian modulus resilien campuran



Gambar 12 Model variasi lapis perkerasan

Tabel 2. Karakteristik material

Jenis bahan	Modulus tipikal	Rasio Poisson	Kadar (KAO) dan volume aspal (Vb)
AC-WC (2 x 50 tumbukan)	1000 MPa	0,4	6% dan 12,55%
AC-BC (2 x 75 tumbukan)	1200 MPa	0,4	5,7% dan 11,92%
AC-Base (2 x 75 tumbukan)	1500 MPa	0,4	5,7% dan 11,92%
IRBCAE	197,5 Mpa	0,35	
CTRB	3950 Mpa (<i>pre-cracking</i>) 500 Mpa (<i>post-cracking</i>)	0,2 0,35 (retak)	
Pondasi eksisting	250 MPa	0,35	
Tanah dasar	10 x CBR (MPa)	0,45	

Analisis desain struktur perkerasan

Analisis desain struktur perkerasan dilakukan dengan memodelkan lapis perkerasan dengan variasi pada lapisan di atas lapisan pondasi yang distabilisasi seperti Gambar 12. Karakteristik material yang digunakan mengacu pada Manual Desain Perkerasan 2024 seperti pada Tabel 2.

Analisis *pre/post cracking* pada lapis pondasi dilakukan pada Gambar 12 (variasi ketiga, paling kanan) dengan lapis permukaan baru tebal 175 mm. Untuk lapisan permukaan baru dengan tebal kurang dari 175 mm, analisis *post cracking* pada lapis pondasi yang dilakukan dalam analisis dan design struktur perkerasan (Direktorat Jenderal Bina Marga, 2024).

Tebal minimum lapis permukaan 175 mm ini dimaksudkan untuk mencegah retak refleksi akibat keretakan yang terjadi pada lapisan pondasi yang distabilisasi. Jika tebal lapis permukaan kurang dari 175 mm disarankan menggunakan lapisan SAMI (*Strain Absorbing Membrane Interlayers*) diantara lapisan permukaan dan lapisan pondasi

yang distabilisasi (Direktorat Jenderal Bina Marga, 2024).

Untuk keperluan analisis struktur, dibuat model struktur lapis perkerasan dengan variasi ketebalan lapisan beraspal. Hasil dari analisis struktur ini menghasilkan respon struktur pada lokasi kritis seperti yang ditunjukkan pada Tabel 3. Selanjutnya dengan menggunakan Persamaan 4, 5, dan 6 didapat kapasitas struktur berupa *allowable repetition load* dalam satuan ESA. Hasilnya menunjukkan bahwa penambahan tebal lapis perkerasan meningkatkan kapasitas struktur lapis perkerasan. Pada struktur perkerasan dengan campuran IRBCAE, kerusakan *fatigue* terjadi di lapis permukaan. Sedangkan pada perkerasan dengan campuran CTRB, kerusakan akibat *fatigue* lebih awal terjadi di lapisan CTRB tersebut. Dari analisis respon struktur didapat bahwa dengan beban dan tebal yang sama, perkerasan lapis pondasi atas IRBCAE menghasilkan ketahanan lelah lebih tinggi dibandingkan dengan perkerasan dengan lapis pondasi bersemen (CTRB). Campuran CTRB yang ditambahkan aspal emulsi dapat meningkatkan kapasitas regangan dalam

mengimbangi efek susut dari proses hidrasi semen.

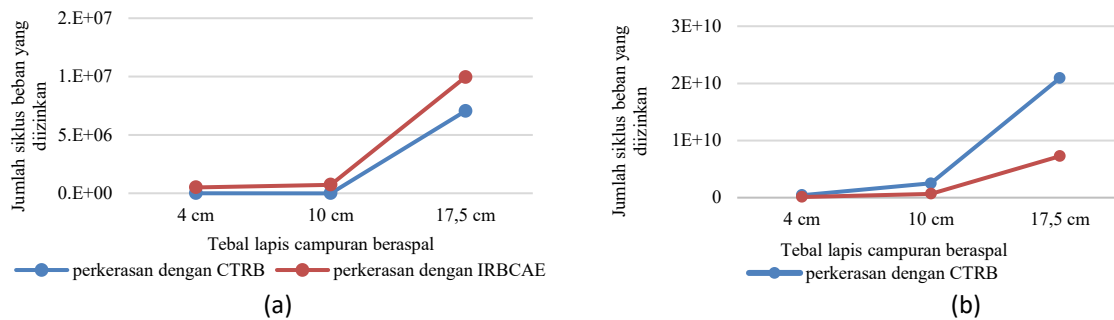
Perbedaan sifat mekanis ini berdampak langsung pada perilaku struktural perkerasan. Kekakuan tinggi pada CTRB memberikan keunggulan dalam menahan deformasi permanen, terutama pada kondisi lalu lintas berat dan berulang. Namun, sifat tersebut juga menyebabkan CTRB lebih rentan terhadap retak, khususnya retak susut dan retak refleksi, karena keterbatasan dalam meredam tegangan tarik. Di sisi lain, IRBCAE yang lebih fleksibel mampu menyebarkan tegangan secara lebih merata dan mempertahankan sebagian kekuatannya meskipun terjadi retak, sehingga

menunjukkan kinerja yang lebih baik dalam hal ketahanan terhadap retak lelah (*fatigue*). Dengan demikian, pemilihan jenis campuran perlu disesuaikan dengan kondisi lalu lintas, lingkungan, dan strategi pemeliharaan yang direncanakan.

Perkerasan dengan CTRB dengan tebal lapisan beraspal kurang dari 175 mm akan mencapai retak lelah lebih awal dan berpotensi terjadinya retak reflektif sebelum tercapainya kelelahan pada lapis permukaan beraspal. Perkerasan dengan IRBCAE mampu menahan *fatigue* lebih tinggi walaupun dengan tebal lapisan beraspal kurang dari 175 mm (lihat Gambar 13).

Tabel 3. Perhitungan kapasitas struktur berdasarkan respon struktur masing-masing variasi lapis perkerasan

Konfigura si lapisan perkerasa n	Ketebalan lapisan (mm)	Respon struktur ($\mu\epsilon$)			Allowable repetition load (ESA)		
		Di bawah lapisan aspal	Di bawah lapisan stabilisasi	Di atas lapisan tanah dasar	Asphalt fatigue	Stabilisasi fatigue	Permanent deformation
IRBCAE + AC-WC	AC-WC : 40 IRBCAE : 200 LFA Eks : 200 Subgrade : ~	537,4	234,6	656,4	500.153	249.827.701	114.604.226
CTRB + AC-WC	AC-WC : 40 CTRB : 200 LFA Eks : 200 Subgrade : ~	207,9	233,6	544,8	57.718.987	1	422.397.119
IRBCAE + AC-WC + AC-BC	AC-WC : 40 AC-BC : 60 IRBCAE : 200 LFA Eks : 200 Subgrade : ~	444,9	173,7	510,9	733.456	1.122.746.071	662.261.214
CTRB + AC-WC + AC-BC	AC-WC : 40 AC-BC : 60 CTRB : 200 LFA Eks : 200 Subgrad : ~ e	227,1	181,6	422,3	21.164.135	41	2.512.077.710
IRBCAE + AC-WC + AC-BC + AC-Base	AC-WC : 40 AC-BC : 60 AC-Base : 75 IRBCAE : 200 LFA Eks : 200 Subgrade : ~	243,7	117,6	362,9	9.953.379	7.893.034.991	7.258.917.532
CTRB + AC-WC + AC-BC + AC-Base	AC-WC : 40 AC-BC : 60 AC-Base : 75 CTRB : 200 LFA Eks : 200 Subgrade : ~	Pre : 6,3 Post:147,2	Pre : 66,7 Post:30,2	Pre:185,9 Post:312	130.843.748	7.047.031	20.914.184.702



Gambar 13. Perbandingan ketahanan terhadap (a) leleh dan (b) deformasi permanen perkerasan dengan IRBCAE dan CTRB

Kesimpulan

Komposisi campuran lapisan pondasi yang distabilisasi sangat tergantung dari kebutuhan terhadap desain, ditentukan berdasarkan karakteristik masing-masing material penyusun campuran yang harus diverifikasi terlebih dahulu melalui pengujian eksperimental. Pada penelitian ini menghasilkan beberapa poin penting sesuai hasil campuran:

Material daur ulang lapis perkerasan beraspal yang diteliti mempunyai kadar aspal 5,34% dengan proporsi agregat lapis campuran beraspal dan agregat lapis pondasi sebesar 49% dan 51%. Pada campuran lapis pondasi hasil daur ulang perkerasan dengan semen, penambahan aspal emulsi akan menyebabkan campuran memiliki sifat kelenturan dan memiliki *residual strength* yang menurun seiring dengan peningkatan kadar semen. Untuk menjamin campuran tersebut tetap bersifat lentur, kadar semen tidak bisa melebihi kadar aspal emulsi. Peningkatan kadar semen berpengaruh pada peningkatan nilai kuat tekan bebas dan *primary displacement*.

Lapis pondasi yang distabilisasi dengan semen (CTRB) memiliki nilai kuat tekan bebas dan modulus resilien yang lebih tinggi dibandingkan campuran yang ditambah aspal emulsi. Campuran bersifat kaku yang ditunjukkan dengan rendahnya rentang regangan dan tingginya modulus resilien. Modulus resilien CTRB ikut meningkat seiring dengan peningkatan suhu pengujian. Lapis pondasi yang distabilisasi dengan semen dan aspal emulsi (IRBCAE) memiliki nilai kuat tekan bebas dan modulus resilien yang lebih kecil. Campuran ini memiliki fleksibilitas yang ditunjukkan dengan besarnya rentang regangan dan rendahnya modulus resilien. Modulus resilien IRBCAE menurun pada peningkatan suhu yang menandakan adanya sifat viskoelastis dari bitumen. Analisis struktur perkerasan dengan variasi lapis pondasi yang menggunakan IRBCAE dan CTRB dapat disimpulkan bahwa, pada lapis pondasi IRBCAE menunjukkan regangan kritis terjadi pada bagian

bawah lapis permukaan beraspal, sedangkan pada lapis pondasi CTRB regangan kritis terjadi pada bagian bawah lapis pondasi CTRB, sehingga dibutuhkan lapis permukaan beraspal dengan ketebalan lebih dari 175 mm agar tidak terjadi retak refleksi. Struktur perkerasan dengan lapis pondasi IRBCAE memiliki ketahanan *fatigue* yang lebih tinggi, sedangkan struktur perkerasan dengan lapis pondasi CTRB memiliki ketahanan *permanent deformation* lebih tinggi.

Daftar Pustaka

- Adithya, A. P., Subagio, B. S., Kosasih, D., & Hendarto, S. (2016). Evaluasi Karakteristik Modulus Resilien dan Deformasi Permanen Campuran Beton Beraspal (AC-Binder Course) Menggunakan Campuran Agregat Berabrasi Tinggi. *Agustus*, 23(2), 223–232. <https://doi.org/https://doi.org/10.5614/jts.2016.23.3.7>
- Asphalt Academy (2009). *Asphalt Academy* (2nd ed.), Asphalt Academy. www.asphaltacademy.co.za
- Cardone, F., Grilli, A., Bocci, M., & Graziani, A. (2015). Curing and temperature sensitivity of cement-bitumen treated materials. *International Journal of Pavement Engineering*, 16(10), 868–880. <https://doi.org/10.1080/10298436.2014.966710>
- Chakravarthi, S., & Shankar, S. (2021). Utilization of recycled aggregates in cement-treated bases: a state-of-the-art review. *Innovative Infrastructure Solutions*, 6(4). <https://doi.org/10.1007/s41062-021-00555-4>
- Corradini, A., Cerni, G., & Porceddu, P. R. (2021a). Comparative study on resilient modulus of natural and post-quake recycled aggregates in bound and unbound pavement subbase applications. *Construction and Building Materials*, 297. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.123717>

- Corradini, A., Cerni, G. & Porceddu, P. R. (2021b). Comparative study on resilient modulus of natural and post-quake recycled aggregates in bound and unbound pavement subbase applications. *Construction and Building Materials*, 297. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.123717>
- Departemen Pekerjaan Umum. (2005). *Perencanaan campuran lapis pondasi hasil daur ulang perkerasan lama dengan semen*.
- Direktorat Jenderal Bina Marga. (2024). *Manual Design Perkerasan Jalan 2024*. Surat Edaran No. 15/SE/Db/2024.
- Direktorat Jenderal Bina Marga. (2023). *Spesifikasi Khusus Interim Lapis Pondasi Daur Ulang Perkerasan Eksisting Dengan Semen Dan Aspal Emulsi*. Skh.1.5.26 .
- Diyanti, Supomo, F. Y., & Setyaningsih, S. I. (2024). Performance Analysis of Recycled Asphalt Material Foundation Layer and Top Foundation Layer Reviewed from Primary Displacement. *Jurnal Penelitian Pendidikan IPA*, 10(11), 8960–8968. <https://doi.org/10.29303/jppipa.v10i11.9182>
- Dolzycki, B., Jaczewski, M., & Szydłowski, C. (2017). The long-term properties of mineral-cement-emulsion mixtures. *Construction and Building Materials*, 156, 799–808. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.09.032>
- Dołżycki, B., & Jaskuła, P. (2019). Review and evaluation of cold recycling with bitumen emulsion and cement for rehabilitation of old pavements. In *Journal of Traffic and Transportation Engineering (English Edition)* (Vol.6, Issue 4, pp. 11–323). Chang'an University. <https://doi.org/10.1016/j.jtte.2019.02.002>
- Du, S. (2018). Effect of curing conditions on properties of cement asphalt emulsion mixture. *Construction and Building Materials*, 164, 84–93. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.12.179>
- Galan, J. J., Silva, L. M., Pasandín, A. R., & Pérez, I. (2020). Evaluation of the resilient modulus of hot-mix asphalt made with recycled concrete aggregates from construction and demolition waste. *Sustainability (Switzerland)*, 12(20), 1–14. <https://doi.org/10.3390/su12208551>
- Graziani, A., Godenzoni, C., Cardone, F., & Bocci, M. (2016). Effect of curing on the physical and mechanical properties of cold-recycled bituminous mixtures. *Materials and Design*, 95, 358–369. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2016.01.094>
- Junaid, M., Shah, M. Z. A., Yaseen, G., Awan, H. H., Khan, D., & Jawad, M. (2022). Investigating the Effect of Gradation, Temperature and Loading Duration on the Resilient Modulus of Asphalt Concrete. *Civil Engineering Journal (Iran)*, 8(2), 278–289. <https://doi.org/10.28991/CEJ-2022-08-02-07>
- Kasu, S. R., Manupati, K., & Muppireddy, A. R. (2020). Investigations on design and durability characteristics of cement treated reclaimed asphalt for base and subbase layers. *Construction and Building Materials*, 252. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.119102>
- Meng, Y., & Liu, L. (2020). Impact of preheating temperatures and rap characteristics on the activation of rap binder. *Applied Sciences (Switzerland)*, 10(23), 1–15. <https://doi.org/10.3390/app10238378>
- Mignini, C., Cardone, F., & Graziani, A. (2018). Experimental study of bitumen emulsion–cement mortars: mechanical behaviour and relation to mixtures. *Materials and Structures/Materiaux et Constructions*, 51(6). <https://doi.org/10.1617/s11527-018-1276-y>
- Nanthavisit, P., Jitsangiam, P., & Pichayapan, P. (2019). Influence of cement and asphalt emulsion ratios on cement-asphalt emulsion mortar. *International Journal of GEOMATE*, 17(64). <https://doi.org/10.21660/2019.64.08722>
- Rahman, M. T., Mohajerani, A., & Giustozzi, F. (2020). Recycling of waste materials for asphalt concrete and bitumen: A review. *Materials*, 13(7). <https://doi.org/10.3390/ma13071495>
- ScholarWorks, U., Graduate Theses, U., & Joshua LeBow, C. (2018). *Effect of Cement Content on Concrete Performance*. <https://scholarworks.uark.edu/etd>
- Suaryana Pusat Litbang Jalan dan Jembatan Jl Nasution, N. A. (n.d.). *Kajian Pemanfaatan Kapur Padam sebagai Pengganti Semen dalam Campuran CMRFB (A Study of Hydrated Lime Utilization as Cement Replacement in Cold Mix Recycling Foam Bitumen)*.
- Zhao, X., Dong, Q., Chen, X., & Ni, F. (2021). Meso-cracking characteristics of rubberized cement-stabilized aggregate by discrete element method. *Journal of Cleaner Production*, 316. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.128374>