

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Infrastruktur jalan raya merupakan tulang punggung konektivitas nasional yang menopang seluruh aktivitas ekonomi dan sosial masyarakat. Berdasarkan data Kementerian Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat (PUPR), sebagian besar kerusakan jalan nasional di Indonesia disebabkan oleh kegagalan pada lapisan permukaan perkerasan yang tidak mampu menahan beban lalu lintas berat secara berulang maupun fluktuasi suhu lingkungan yang ekstrem. Kondisi ini berujung pada pemborosan anggaran pemeliharaan yang besar dan penurunan kualitas layanan transportasi secara keseluruhan. Tantangan tersebut mendorong para insinyur teknik sipil untuk terus berinovasi dalam mencari material perkerasan yang lebih andal, ekonomis, dan berkelanjutan.

Salah satu lapisan yang paling rentan terhadap kerusakan tersebut adalah lapisan *Asphalt Concrete Wearing Course (AC-WC)*. Sebagai lapisan permukaan yang bersentuhan langsung dengan roda kendaraan dan cuaca, *AC-WC* dituntut untuk memenuhi dua persyaratan mekanis yang secara alamiah saling bertolak belakang: di satu sisi harus memiliki kekakuan struktural yang cukup untuk mencegah alur (*rutting*) akibat beban lalu lintas berat, namun di sisi lain harus mempertahankan fleksibilitas yang memadai agar tidak mudah retak (*cracking*) akibat beban berulang dan perubahan suhu yang ekstrem. Dua tuntutan mekanis yang saling bertolak belakang inilah yang menjadikan pemilihan dan inovasi material campuran *AC-WC* sebagai tantangan teknis yang kompleks dan terus relevan untuk dikaji.

Dalam konteks pencarian material inovatif tersebut, pemanfaatan limbah industri lokal yang belum termanfaatkan secara optimal menjadi peluang yang menarik untuk dikembangkan. Wilayah Bojonegoro, Tuban, dan sekitarnya merupakan sentra industri mebel dan penggergajian kayu jati yang secara rutin menghasilkan limbah serbuk kayu dalam volume besar. Limbah ini selama ini hanya dibakar atau dibuang begitu saja sehingga berpotensi menjadi beban lingkungan. Demikian pula, limbah minyak jelantah (*Waste Cooking Oil/WCO*) dari sektor rumah tangga dan industri kuliner terus meningkat volumenya namun pengelolaannya masih sangat minim di Indonesia. Kedua limbah lokal ini memiliki nilai ekonomi yang sangat rendah, namun ternyata secara teknis menyimpan potensi rekayasa material yang besar dalam bidang perkerasan jalan sehingga pemanfaatannya akan memberikan manfaat ganda, yakni mengurangi biaya material konstruksi sekaligus berkontribusi pada pengurangan limbah lingkungan.

Abu kayu jati terbukti memiliki potensi teknis yang signifikan sebagai *filler* substitusi dalam campuran beraspal. Material ini mengandung silika (SiO_2) dominan yang bersifat pozzolan dan reaktif, sehingga mampu mengisi rongga campuran secara agresif dan memperkuat ikatan antarmolekul aspal. Sani et al. (2024) menemukan bahwa penambahan 6% abu kayu jati meningkatkan nilai stabilitas *Marshall* dan densitas campuran secara signifikan, disertai penurunan nilai penetrasi aspal hingga 16% dan peningkatan modulus

kekakuan hampir dua kali lipat. Peningkatan kekakuan struktural ini memang ideal dalam mengatasi masalah alur (*rutting*), namun memiliki konsekuensi teknis yang serius: campuran aspal menjadi sangat kaku, getas (*brittle*), dan rentan terhadap retak lelah (*fatigue cracking*) akibat beban lalu lintas yang berulang ditandai dengan penurunan nilai kelelahan (*Flow*) pada pengujian *Marshall* secara drastis.

Pada sisi yang berlawanan, limbah minyak jelantah (*WCO*) menunjukkan karakteristik teknis yang bertolak belakang dengan abu kayu jati. *WCO* yang telah mengalami pemanasan berulang mengandung asam lemak bebas (*Free Fatty Acid/FFA*) dengan struktur hidrokarbon yang memiliki kemiripan tinggi dengan fraksi *Maltene* pada aspal komponen yang bertanggung jawab atas elastisitas dan kelecakan aspal. Inilah yang menjadikan *WCO* potensial dimanfaatkan sebagai *Bio-Flux* atau agen peremaja (*rejuvenator*) alami pada campuran aspal (Hamzah et al., 2025). Hamzah et al. (2025) membuktikan bahwa penambahan *WCO* sebesar 3% hingga 4% terhadap berat aspal mampu memperbaiki sifat kohesi, menurunkan viskositas, dan meningkatkan fleksibilitas campuran. Akan tetapi, penggunaan *WCO* di atas dosis tersebut justru memicu pelunakan berlebih, ditandai dengan menurunnya nilai *Resilient Modulus* dan ketahanan *Dynamic Creep* secara drastis, sehingga campuran menjadi terlalu lembek dan gagal menahan deformasi permanen (*rutting*).

Dari paparan kedua material di atas, terlihat jelas bahwa abu kayu jati dan minyak jelantah memiliki sifat fisika-kimia yang secara fundamental saling berlawanan. Abu kayu jati cenderung mengeraskan dan mengkaku matriks aspal melalui penyerapan fraksi *Maltene* secara agresif, sementara minyak jelantah justru melunak dan melenturkannya dengan cara menyuntikkan kembali unsur serupa *Maltene* ke dalam struktur aspal. Pertentangan karakteristik inilah yang menjadi dasar konsep *Dual-modification* (modifikasi ganda) dalam penelitian ini. Secara teoritis, jika kedua material dikombinasikan dalam dosis yang terukur dan terkontrol, efek negatif masing-masing material akan saling menetralkan: kegetasan yang diakibatkan oleh abu kayu jati dikompensasi oleh efek pelunak dari minyak jelantah, sementara risiko pelunakan berlebih dari minyak jelantah ditahan oleh kekakuan struktural yang diberikan oleh abu kayu jati. Dengan demikian, sinergi teknis antara kedua material limbah ini secara teoritis mampu menghasilkan campuran *AC-WC* yang sekaligus kaku dalam menahan beban dan lentur dalam menerima regangan.

Konsep sinergi *Dual-modification* tersebut belum pernah dibuktikan secara empiris dalam satu matriks penelitian yang komprehensif. Studi Sani et al. (2024) mengevaluasi kinerja abu kayu jati sebagai *filler* substitusi tanpa menghadirkan kompensator untuk mengatasi kegetasan yang ditimbulkannya. Sebaliknya, studi Hamzah et al. (2025) mengevaluasi efek peremajaan *WCO* tanpa mengimbangnya dengan bahan pengaku struktural. Belum ada riset yang mengintegrasikan kedua material limbah ini secara simultan dalam satu rancangan eksperimen guna menentukan kombinasi dosis optimal yang menghasilkan keseimbangan parameter *Marshall* yang ideal sesuai Spesifikasi Umum Bina Marga 2018 Revisi 2.

Kesenjangan penelitian tersebut memiliki implikasi praktis yang nyata di lapangan. Penggunaan abu kayu jati tanpa kompensator akan mempercepat kerusakan jalan berupa retak dalam waktu singkat, sedangkan penggunaan *WCO* tanpa bahan pengaku akan memperparah deformasi alur yang membahayakan pengguna jalan. Untuk mengisi kesenjangan ini secara ilmiah, penelitian ini merancang variasi campuran yang terstruktur dan terukur. Sebagai acuan dasar (*Baseline*), digunakan benda uji kontrol berupa campuran *AC-WC* dengan Kadar Aspal Optimum (KAO) murni tanpa penambahan abu kayu jati maupun minyak jelantah atau disebut variasi 0%. Keberadaan benda uji kontrol ini sangat krusial karena berfungsi sebagai garis batas perbandingan yang objektif. Tanpa data *Baseline* ini, tidak mungkin disimpulkan secara ilmiah apakah perubahan nilai parameter *Marshall* yang terjadi benar-benar merupakan pengaruh nyata dari mekanisme *Dual-modification*, ataukah semata-mata merupakan variasi alamiah dari campuran aspal standar.

Berdasarkan seluruh uraian di atas, penelitian ini mengajukan mekanisme *Dual-modification* sebagai solusi inovatif atas kesenjangan yang ada. Pendekatan ini dirancang untuk menciptakan sinergi teknis di mana abu kayu jati berperan sebagai *reinforcing filler* yang mendongkrak stabilitas struktural, sementara minyak jelantah bertindak sebagai *Bio-Flux* yang menjaga elastisitas campuran agar tidak getas. Dengan menggunakan data KAO murni (0%) sebagai *Baseline* pembanding dan menerapkan variasi kadar kedua material limbah lokal secara terstruktur, penelitian ini diharapkan mampu menemukan titik keseimbangan parameter *Marshall* yang paling ideal. Atas dasar pertimbangan teknis serta upaya pemanfaatan limbah lokal yang berkelanjutan tersebut, maka penulis melakukan penelitian dengan judul: **“ANALISIS MEKANISME DUAL-MODIFICATION PADA CAMPURAN AC-WC: PEMANFAATAN MINYAK JELANTAH SEBAGAI BIO-FLUX DAN ABU KAYU JATI SEBAGAI REINFORCING FILLER”**

1.2 Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang diatas, rumusan masalah yang didapat yaitu sebagai berikut:

1. Bagaimana pengaruh pemanfaatan Minyak Jelantah sebagai *bio-flux* (dengan variasi kadar 0%, 4%, 5%, dan 6%) dan Abu Kayu Jati sebagai *reinforcing filler* (dengan variasi kadar 0%, 6%, 8%, dan 10%) terhadap karakteristik properti *Marshall* pada campuran *AC-WC*?
2. Bagaimana variasi nilai parameter *Marshall* (Stabilitas, *Flow*, VIM, VMA, VFA, dan *Marshall Quotient*) pada campuran *AC-WC* akibat modifikasi ganda (*Dual-modification*) dengan variasi kadar Minyak Jelantah (0%, 4%, 5%, 6%) dan Abu Kayu Jati (0%, 6%, 8%, 10%) ?.

3. Pada komposisi kadar berapakah campuran Minyak Jelantah dan Abu Kayu Jati mampu mencapai kinerja *Marshall* optimum sesuai standar Spesifikasi Umum Bina Marga 2018.

1.3 Batasan Masalah

Agar pembahasan dalam penelitian ini terarah, dan tidak terlalu luas, tidak menyimpang dari permasalahan, maka perlu adanya batasan-batasan masalah sebagai berikut :

1. Peneliti membatasi variasi material modifikasi pada campuran *AC-WC* secara presisi. Peneliti menetapkan dosis limbah minyak jelantah hanya sebesar 0%, 4%, 5%, dan 6% terhadap berat aspal. Peneliti menetapkan substitusi abu kayu jati hanya sebesar 0%, 6%, 8%, dan 10% terhadap total berat *Filler*.
2. Peneliti membatasi evaluasi kinerja laboratorium murni pada pengujian karakteristik *Marshall*. Pengujian ini merujuk langsung pada parameter Spesifikasi Umum Bina Marga 2018. Peneliti secara tegas tidak melakukan pengujian viskositas reologi aspal dan pengujian durabilitas rendaman jangka panjang.

1.4 Tujuan Penelitian

Adapun tujuan dari Penelitian ini adalah :

1. Mengidentifikasi pengaruh mekanisme *Dual-modification* menggunakan abu kayu jati dan minyak jelantah terhadap karakteristik *Marshall* campuran *AC-WC* dibandingkan dengan campuran kontrol KAO murni.
2. Menganalisis pola perubahan nilai Stabilitas, *Flow*, *VIM*, *VMA*, *VFA*, dan *Marshall Quotient* campuran *AC-WC* pada berbagai variasi kadar abu kayu jati dan minyak jelantah..
3. Menentukan komposisi kadar optimal abu kayu jati dan minyak jelantah yang menghasilkan kinerja *Marshall* terbaik sesuai Spesifikasi Umum Bina Marga 2018 Revisi 2.

1.5 Manfaat Penelitian

Adapun manfaat dari Penelitian ini adalah :

1. Manfaat Teoritis Penelitian ini memberikan kontribusi ilmiah berupa data empiris mengenai mekanisme *Dual-modification* pada campuran *AC-WC*, khususnya interaksi teknis antara abu kayu jati sebagai *reinforcing filler* dan

minyak jelantah sebagai *bio-flux*. Hasil penelitian ini dapat dijadikan referensi dan landasan bagi penelitian lanjutan dengan topik modifikasi campuran aspal menggunakan limbah lokal.

2. Manfaat Praktis Hasil penelitian ini dapat menjadi rekomendasi teknis bagi praktisi dan instansi terkait, khususnya Dinas Pekerjaan Umum, dalam mempertimbangkan penggunaan abu kayu jati dan minyak jelantah sebagai material alternatif yang ekonomis pada pekerjaan konstruksi perkerasan jalan.
3. Manfaat Lingkungan Pemanfaatan limbah abu kayu jati dari industri mebel dan minyak jelantah dari sektor rumah tangga secara bersamaan dalam campuran aspal berkontribusi pada pengurangan volume limbah lokal yang selama ini belum termanfaatkan secara optimal, sehingga mendukung prinsip konstruksi yang berkelanjutan (*sustainable construction*).

Diharapkan penelitian ini dapat berguna bagi para pembaca, khususnya mahasiswa program studi Teknik Sipil Universitas Bojonegoro.