

BAB V

KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan hasil penelitian dan pembahasan mengenai mekanisme *Dual-modification* menggunakan abu serbuk kayu jati sebagai substitusi *filler* dan minyak jelantah sebagai bahan modifikasi aspal pada campuran *AC-WC*, dapat ditarik kesimpulan sebagai berikut:

1. Penggunaan minyak jelantah dan abu serbuk kayu jati memberikan dampak mekanis yang saling menyeimbangkan (komplementer) terhadap karakteristik Marshall campuran *AC-WC*. Minyak jelantah efektif menurunkan viskositas aspal untuk meningkatkan kelenturan (*Flow*), sementara abu kayu jati memberikan efek kekakuan (*stiffening*) untuk mendongkrak stabilitas. Dibandingkan dengan campuran kontrol pada KAO 6,5% (stabilitas 1.512,13 kg; *Flow* 2,73 mm; VIM 4,00%; VMA 15,30%; VFA 73,86%; dan MQ 555,20 kg/mm), penerapan kedua limbah tersebut pada dosis optimum terbukti mampu mempertahankan campuran agar tetap berada dalam koridor kelayakan. Sebaliknya, aplikasi dosis ekstrem (kadar jelantah menyentuh 6% atau abu kayu jati 10%) memicu kegagalan campuran, yang diindikasikan oleh melonjaknya VIM melampaui 5%, merosotnya VFA di bawah ambang 65%, dan anjloknya nilai *Flow* (hingga 1,71 mm).
2. Sinergi penggabungan kedua material tersebut menghasilkan pola fluktuasi parameter Marshall yang sangat logis dan konsisten. Peningkatan takaran minyak jelantah berkorelasi positif terhadap kenaikan persentase *Flow* dan rongga udara (VIM), namun berimbas pada pelemahan nilai stabilitas dan VFA akibat pelunakan matriks aspal. Di sisi yang berseberangan, semakin tinggi substitusi abu kayu jati, nilai stabilitas dan *Marshall Quotient* (indikator kekakuan) akan semakin meningkat, berbarengan dengan penurunan nilai *Flow*. Walaupun terjadi efek tarik-ulur (*trade-off*) pada sifat reologi tersebut, komposisi campuran pada rentang kadar optimumnya secara konsisten lulus persyaratan teknis Spesifikasi Umum Bina Marga 2018 Revisi 2 (Stabilitas ≥ 800 kg, *Flow* 2,0–4,0 mm, VIM 3,0–5,0%, VMA $\geq 15\%$, VFA $\geq 65\%$, dan MQ ≥ 250 kg/mm).
3. Komposisi rekayasa material yang mampu mencapai kinerja Marshall optimum dipusatkan pada Kadar Aspal Optimum (KAO) teruji sebesar 6,5%. Berdasarkan

identifikasi jendela spesifikasi, diperoleh Kadar Penambahan Optimum (KPO) minyak jelantah berada di angka 5,1% (untuk variasi abu kayu jati 6% dan 8%), serta bergeser naik ke angka 5,3% (untuk mengkompensasi kegetasan pada abu kayu jati 10%). Bila diakumulasikan, perpaduan komposisi paling sinergis jatuh pada KAO 6,5% dengan substitusi abu serbuk kayu jati 6% dan injeksi minyak jelantah 5,1%. Kombinasi ini tidak hanya menghasilkan tingkat stabilitas struktural yang kokoh dan memenuhi seluruh parameter Bina Marga, tetapi juga menjadi terobosan solutif dalam pemanfaatan material limbah yang ekonomis dan ramah lingkungan pada sektor perkerasan jalan raya.

5.2 Saran

Berdasarkan hasil penelitian ini, dapat diberikan beberapa saran sebagai berikut:

1. Berdasarkan hasil pengujian, diperoleh komposisi paling optimum yang memenuhi seluruh spesifikasi Bina Marga 2018 adalah KAO 6,5% dipadukan dengan abu kayu jati 6% dan minyak jelantah 5,1% (serta KPO 5,3% untuk abu 10%). Kombinasi ini terbukti mampu memberikan keseimbangan terbaik antara stabilitas, kelenturan, dan rongga campuran. Oleh karena itu, disarankan bagi instansi terkait maupun praktisi jalan raya untuk melakukan uji coba penghamparan skala lapangan (*trial section*) menggunakan formulasi optimum ini sebagai alternatif perkerasan yang ramah lingkungan dan ekonomis.
2. Pada saat pengaplikasian campuran modifikasi di skala *Asphalt Mixing Plant* (AMP), disarankan untuk melakukan pengawasan takaran yang sangat ketat agar injeksi minyak jelantah tidak melebihi kadar 4–5%. Berdasarkan data, penambahan jelantah berlebih (6%) terbukti merusak matriks aspal sehingga VIM meningkat drastis hingga 7,09% dan VFA merosot ke angka 52,44% (keduanya gagal memenuhi spesifikasi). Selain itu, takaran abu kayu jati juga tidak disarankan melebihi batas 8%, karena pada kadar abu 10% yang dikombinasikan dengan jelantah 6%, campuran menjadi terlalu getas hingga nilai Flow anjlok ke angka 1,71 mm. Pengawasan ketat pada VIM dan VFA sebagai parameter pembatas sangat krusial untuk mencegah deformasi perkerasan..
3. Mengingat *dual-modification* ini terbukti mampu mendongkrak stabilitas ke titik puncak yang sangat tinggi, yaitu mencapai 1.821,76 kg (pada kombinasi abu 6% + jelantah 4%) dengan VMA yang seluruhnya aman di atas 15% dan rentang nilai

kekakuan (MQ) berkisar antara 431–605 kg/mm, maka disarankan bagi peneliti selanjutnya untuk mengkaji aspek *durability* (keawetan) jangka panjang. Pengujian lanjutan seperti *Indirect Tensile Strength* (ITS), *Wheel Tracking Test*, atau *Marshall Immersion* (Perendaman Marshall) sangat direkomendasikan untuk mengetahui tingkat kepekaan campuran termodifikasi ini terhadap retak lelah (*fatigue cracking*) dan kerusakan akibat paparan air secara terus-menerus.

DAFTAR PUSTAKA

- Adnyana, I. W. B., & Suaniti, N. M. (2019). Ultimate analysis and acid value of biodiesel from waste oil and ethanol. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 508(1), 012097.
- Al-Sabaei, A. M., et al. (2023). Sustainable use of *Waste Cooking Oil* as a rejuvenator in asphalt concrete. *Journal of Cleaner Production*.
- Alamsyah, M. R. (2001). *Rekayasa Jalan Raya*.
- Alamsyah, M. R., dkk. (2024). Strenght Analysis Asphalt Concrete Mixtures-Bear Course With The Addition Of Teak Wood Saw Ash *Filler* And Portland Cement.
- Anggreana, V., dkk. (2024). Pengaruh Penambahan Abu Limbah Pemotongan Kayu Sebagai Pengganti *Filler* Terhadap Karakteristik *Marshall* Pada Campuran Asphalt Concrete-Binder Course (AC-BC).
- Anggiyansyah, H. (2024). Komposisi Kimia Abu Serbuk Kayu.
- Ansori. (2018). Kandungan Silika pada Abu Serbuk Kayu.
- ASTM. (t.t.). *Standard Terminology Relating to Materials for Roads and Pavements*. American Society for Testing and Materials.
- Azahar, W. N. A. W., et al. (2016). The Potential of *Waste Cooking Oil* as Bio-Asphalt for Alternative Binder. *Jurnal Teknologi*.
- Badan Standardisasi Nasional. (1998). SNI 03-4804-1998: Metode pengujian bobot isi dan rongga udara dalam agregat. Jakarta: BSN.
- Badan Standardisasi Nasional. (2002). SNI 03-6723-2002: Spesifikasi bahan pengisi untuk campuran beraspal. Jakarta: BSN.
- Badan Standardisasi Nasional. (2008). SNI 1969:2008: Cara uji berat jenis dan penyerapan air agregat kasar. Jakarta: BSN.
- Badan Standardisasi Nasional. (2008). SNI 1970:2008: Cara uji berat jenis dan penyerapan air agregat halus. Jakarta: BSN.
- Badan Standardisasi Nasional. (2008). SNI 2417:2008: Cara uji keausan agregat dengan mesin abrasi Los Angeles. Jakarta: BSN.

- Badan Standardisasi Nasional. (2011). SNI 2434:2011: Cara uji titik lembek aspal dengan alat cincin dan bola (ring and ball). Jakarta: BSN.
- Badan Standardisasi Nasional. (2011). SNI 2439:2011: Cara uji penyelimutan dan pengelupasan pada campuran agregat-aspal. Jakarta: BSN.
- Badan Standardisasi Nasional. (2011). SNI 2441:2011: Cara uji berat jenis aspal keras. Jakarta: BSN.
- Badan Standardisasi Nasional. (2011). SNI 2456:2011: Tata cara uji penetrasi aspal. Jakarta: BSN.
- Badan Standardisasi Nasional. (2011). SNI 2489:2011: Metode uji campuran beraspal panas dengan alat *Marshall*. Jakarta: BSN.
- Badan Standardisasi Nasional. (2012). SNI ASTM C136:2012: Metode uji untuk analisis saringan agregat halus dan kasar. Jakarta: BSN.
- Badan Standardisasi Nasional. (2013). SNI 4428:2013: Cara uji nilai setara pasir (sand equivalent) agregat halus. Jakarta: BSN.
- Badan Standardisasi Nasional. (2016). SNI 8287:2016: Cara uji partikel pipih dan lonjong dalam agregat kasar. Jakarta: BSN.
- Direktorat Jenderal Bina Marga. (1987). Petunjuk Pelaksanaan Lapis Aspal Beton (LASTON) untuk Jalan Raya. Pedoman Teknik No. 13/PT/B/1987. Jakarta: Direktorat Jenderal Bina Marga.
- Direktorat Jenderal Bina Marga. (2010). Spesifikasi Umum 2010 (Revisi 3). Jakarta: Kementerian Pekerjaan Umum.
- Direktorat Jenderal Bina Marga. (2018). Spesifikasi Umum Bina Marga 2018 Revisi 2. Jakarta: Kementerian PUPR.
- Hamzah, et al. (2025). Evaluasi Kinerja Limbah Minyak Jelantah sebagai *Bio-Flux*.
- Hardiyanto, H. C. (2007). *Mekanika Tanah dan Teknik Pondasi*.
- Hossain, Z. (2019). Application of *Waste Cooking Oil* in Construction of Asphalt Pavement. *Memorial University of Newfoundland Research Report*.

- Irawan, R., & Hidayat, M. (2022). Pemanfaatan Minyak Jelantah sebagai Agen Peremaja pada Campuran Lapis Permukaan. *Jurnal Teknik Jalan Raya*.
- Juwita & Ariadi. (2018). Karakteristik Perkerasan Lentur (*Flexible Pavement*).
- Laswar, B. G. (2019). Pemanfaatan Abu Limbah Pemotongan Kayu sebagai *Filler*.
- Mistry, R., & Karmakar, S. (2019). Evaluation of moisture susceptibility of asphalt mixtures with combined modification of waste materials. *Journal of Cleaner Production*, 214, 532–540.
- Nopiyanto. (2011). Jenis dan Fungsi Laston dalam Konstruksi Perkerasan Jalan.
- Otoko, G. R., & Honest. (2014). Kandungan Silika pada Limbah Abu Serbuk Kayu.
- Pemerintah Republik Indonesia. (2004). Undang-Undang Republik Indonesia Nomor 38 Tahun 2004 tentang Jalan.
- Pemerintah Republik Indonesia. (2006). Peraturan Pemerintah Nomor 34 Tahun 2006 tentang Jalan.
- Pratama, R., dkk. (2021). Kinerja Campuran *AC-WC* Menggunakan Limbah Abu Kayu sebagai Pengganti Sebagian *Filler*. *Jurnal Teknik Sipil dan Arsitektur*.
- Prasetyo, E., dkk. (2024). Karakteristik *Marshall* Campuran *AC-WC* dengan Substitusi *Bio-Flux* Minyak Jelantah. *Jurnal Infrastruktur Terapan*.
- Purnomo, H., & Riyanto, A. (2020). Pemanfaatan Limbah Serbuk Gergaji Kayu sebagai *Filler* Alternatif pada Lapis Permukaan *AC-WC*. *Jurnal Teknik Sipil dan Arsitektur*.
- Saodang, H. (2005). *Konstruksi Jalan Raya*. Bandung: Nova.
- Seenii, et al. (2020). Performance of asphalt concrete wearing course (*AC-WC*) using *Waste Cooking Oil*.
- Sani, R., dkk. (2024). Optimasi Kadar Abu Kayu Jati sebagai Material Pengisi pada Campuran Aspal Panas.
- Sukirman, S. (2003). *Beton Aspal Campuran Panas*. Jakarta: Granit.
- Sukirman, S. (2010). *Perencanaan Tebal Struktur Perkerasan Lentur*. Bandung: Nova.

- Sulaksono, S. (2001). *Rekayasa Jalan*. Bandung: ITB Press.
- Sun, Z., et al. (2021). Properties of asphalt binder *Modified* by bio-oil derived from *Waste Cooking Oil*. *Construction and Building Materials*.
- Wibowo, A., & Kusuma, D. (2022). Evaluasi Kinerja Abu Serbuk Kayu Jati terhadap Karakteristik *Marshall* Campuran *AC-WC*. *Jurnal Rekayasa Sipil*.
- Zargar, et al. (2012). A Review on *Waste Cooking Oil* as an Alternative Binder for Asphalt. *Materials Science and Engineering*.
- Zhu, et al. (2017). Laboratory evaluation of asphalt mixture containing recycled wood chips.