

Evaluasi Pemenuhan Nilai Kepadatan (*Density*) Campuran Beraspal pada Pekerjaan Jalan

Bagus Hario Setiadji*, Sriyana, Amelia Kusuma Indriastuti, Hanna Chintya Febriani Gunawan

Program Studi Program Profesi Insinyur Fakultas Teknik, Universitas Diponegoro,
Jl. Prof. Soedarto, SH, Tembalang, Semarang, Indonesia 50275

*Corresponding author: bhsetiadji@gmail.com

(Received: March 28, 2026; Accepted: April 30, 2026)

Abstract

Evaluation of the Fulfillment of Asphalt Mixture Density Values in Road Works. Ideal road infrastructure requires standardized construction and routine maintenance to ensure safe, smooth, and sustainable service. However, in practice, achieving this ideal condition often encounters obstacles, one of which is the failure to meet asphalt mix density standards. This study aims to identify the root causes of this failure to achieve density through a case study of several road sections in one of the regencies/cities in North Kalimantan Province. The research methods included field observations, interviews, and sample collection and testing. The results confirmed that several road sections did indeed fail to achieve the required density level. This failure was caused by many factors, primarily weak understanding among the project stakeholders, a lax oversight system, and minimal documentation of the work process. These weaknesses occurred evenly across all stages, from material preparation and asphalt mix production to on-site spreading and compaction. As a solution, this study recommends two things: the use of a checklist to guide project stakeholders in carrying out each work step to achieve the specified density, and the proposal to implement strict and accountable supervision to ensure that project stakeholders fulfill all items in the checklist and carry out work with high professional morals and ethics.

Keywords: *density, asphalt mixture, checklist, quality control, stakeholders implementing the work*

Abstrak

Infrastruktur jalan yang ideal membutuhkan konstruksi yang memenuhi standar dan pemeliharaan rutin untuk menjamin pelayanan yang aman, lancar dan berkelanjutan. Namun dalam praktiknya, pencapaian kondisi ideal ini sering menemui kendala, salah satunya adalah kegagalan dalam memenuhi standar kepadatan campuran beraspal. Penelitian ini bertujuan mengidentifikasi akar penyebab ketidaktercapaian kepadatan tersebut dengan studi kasus pada beberapa ruas jalan di salah satu kabupaten kota di Provinsi Kalimantan Utara. Metode penelitian mencakup observasi lapangan, wawancara, serta pengambilan dan pengujian sampel. Hasilnya mengonfirmasi bahwa sejumlah ruas jalan memang gagal mencapai tingkat kepadatan yang disyaratkan. Kegagalan ini disebabkan oleh banyak faktor, utamanya pemahaman *stakeholder* pelaksana pekerjaan yang lemah, sistem pengawasan yang tidak ketat dan dokumentasi proses kerja yang minim. Kelemahan ini terjadi secara merata di seluruh tahapan, mulai dari penyiapan material, produksi campuran aspal, hingga penghamparan dan pemadatan di lokasi. Sebagai solusi, penelitian ini merekomendasikan dua hal, yaitu penggunaan daftar periksa (*checklist*) untuk memandu para *stakeholder* pelaksana pekerjaan dalam melaksanakan setiap langkah kerja guna mencapai kepadatan yang sesuai spesifikasi dan usulan melakukan pengawasan secara ketat dan akuntabel untuk menjamin *stakeholder* pelaksana pekerjaan memenuhi semua item dalam daftar periksa dan melaksanakan pekerjaan dengan menjunjung tinggi moral dan etika profesi.

Kata kunci: kepadatan, campuran beraspal, daftar periksa, pengawasan mutu, stakeholder pelaksana pekerjaan

How to Cite This Article: Setiadji, B. H., Sriyana, S., Indriastuti, A. K., & Gunawan, H. C. F. (2026). Evaluasi Pemenuhan Nilai Kepadatan (*Density*) Campuran Beraspal pada Pekerjaan Jalan. *JPII*, 4(2), 124-134. DOI: <https://doi.org/10.14710/jpii.2026.32584>

PENDAHULUAN

Infrastruktur jalan yang berkualitas menjamin keselamatan pengguna jalan, kelancaran mobilitas dan efisiensi biaya transportasi. Jalan yang berkualitas baik mendukung konektivitas antar wilayah, memperlancar distribusi barang dan jasa, serta mendorong pertumbuhan ekonomi. Selain itu, kualitas infrastruktur yang memadai menjamin keberlanjutan pelayanan jalan, dengan umur layan yang lebih panjang dan kebutuhan pemeliharaan yang lebih efisien, sehingga berdampak positif pada peningkatan kualitas hidup masyarakat.

Untuk memenuhi infrastruktur jalan yang berkualitas, pembangunan jalan harus dilakukan melalui perencanaan geometrik dan struktur perkerasan yang sesuai standar, penggunaan material yang memenuhi spesifikasi, penerapan metode konstruksi yang tepat, serta pengawasan mutu yang ketat agar kekuatan, kenyamanan dan umur layan jalan dapat terjamin. Selain itu, sistem drainase yang baik dan fasilitas keselamatan jalan turut menjadi bagian penting dalam proses pembangunan.

Di sisi lain, infrastruktur jalan berkualitas yang telah terbangun sangat memerlukan kegiatan pemeliharaan jalan secara berkelanjutan melalui pemeliharaan rutin untuk perbaikan kecil dan pembersihan drainase, pemeliharaan berkala untuk pelapisan ulang atau perkuatan permukaan, serta rehabilitasi apabila kondisi struktural sudah menurun signifikan. Seluruh kegiatan pemeliharaan harus didasarkan pada hasil survei kondisi jalan dan didukung oleh sistem manajemen jalan yang memastikan bahwa setiap tindakan dilakukan secara tepat waktu, efektif dan efisien. Dengan kombinasi pembangunan sesuai standar dan pemeliharaan yang konsisten, infrastruktur jalan dapat memberikan pelayanan transportasi yang aman, lancar dan berkelanjutan.

Kegiatan pembangunan dan pemeliharaan jalan, seperti yang dijelaskan pada dua alinea di atas, merupakan kegiatan yang diharapkan terjadi pada kondisi ideal. Namun, kondisi riil di lapangan dapat berbeda dengan kondisi ideal tersebut. Pelaksanaan proyek perkerasan jalan sering kali dihadapkan pada masalah tidak terpenuhinya standar pelaksanaan dan penjaminan mutu. Akibatnya, kualitas jalan menurun yang ditandai dengan kerusakan dini, permukaan tidak rata dan daya tahan yang rendah. Masalah ini umumnya disebabkan oleh penggunaan material di bawah spesifikasi, proses konstruksi yang tidak sesuai prosedur (Rotimi, 2024; Kamaludin *et al.*, 2025), serta lemahnya pengawasan dari

pihak yang berwenang (Mulyono, 2006; Rahangdale & Nigam, 2020).

Untuk mengatasi tantangan ini, diperlukan komitmen kuat dari semua pemangku kepentingan. Pemerintah harus tegas dalam menegakkan regulasi dan membina para kontraktor, sementara kapasitas serta integritas pengawas proyek perlu ditingkatkan. Di sisi lain, kontraktor harus menyadari pentingnya mematuhi standar mutu, bukan hanya untuk bisnis mereka tetapi juga untuk kepentingan publik. Masyarakat juga diharapkan dapat berperan aktif mengawasi pelaksanaan proyek di sekitarnya (Di Maddaloni & Davis, 2017). Dengan sinergi yang baik antara pemerintah, kontraktor dan masyarakat, masalah ketidakpatuhan standar pelaksanaan dapat diminimalisir.

Pada artikel ini, permasalahan tidak terpenuhinya standar pelaksanaan diteliti dengan mengambil studi kasus di salah satu kabupaten kota di Provinsi Kalimantan Utara. Permasalahan ini mengemuka setelah adanya temuan dari hasil audit Badan Pemeriksa Keuangan (BPK) pada tahun 2024 berupa ketidaktercapaian tingkat kepadatan campuran beraspal dari beberapa ruas jalan perkotaan dan kabupaten. Ketidaktercapaian tingkat kepadatan campuran beraspal ini tidak hanya terjadi sekali pada tahun 2024, namun telah terjadi berulang kali meskipun tidak selalu melibatkan ruas jalan yang sama. Ketidaktercapaian tingkat kepadatan ini merupakan hal yang sangat mungkin terjadi karena faktor penyebabnya yang cukup banyak, meskipun demikian, informasi lokasi di mana saja ketidaktercapaian tingkat kepadatan ini terjadi sulit ditemukan, karena hal ini umumnya merupakan temuan dari badan audit dan tidak terpublikasikan.

Penelitian ini bertujuan untuk mengungkap mengapa ketidaktercapaian tingkat kepadatan campuran beraspal dapat terjadi berikut akar permasalahannya, sehingga dapat diberikan rekomendasi agar ketidaktercapaian tersebut tidak terulang lagi di masa mendatang. Hasil penelitian ini diharapkan dapat memberikan manfaat untuk menyelesaikan permasalahan ketidaktercapaian tingkat kepadatan campuran beraspal pada ruas jalan di lokasi studi maupun pada ruas jalan di mana pun di seluruh Indonesia.

METODE PENELITIAN

Studi evaluasi pemenuhan tingkat kepadatan (*density*) campuran beraspal ini dilakukan melalui beberapa tahapan:

- a. Inventarisasi kondisi perkerasan jalan dan hal-hal terkait yang menyebabkan tidak tercapainya tingkat kepadatan campuran beraspal. Kegiatan inventarisasi ini meliputi kegiatan pengamatan kondisi jalan di lokasi studi, kunjungan ke beberapa *asphalt mixing plant* (AMP) yang memproduksi campuran beraspal untuk ruas jalan yang ditinjau, wawancara dengan *stakeholder*, kajian dokumen teknis, pengambilan sampel campuran beraspal di lapangan dengan cara *coring* dan pengujian kepadatan hasil *coring* lapangan. Pengambilan sampel dilakukan pada 6 ruas jalan perkerasan lentur di lokasi studi yang memperoleh penanganan berupa pelapisan ulang (*overlay*) pada tahun 2024.
- b. Analisis penyebab permasalahan ketidaktercapaian tingkat kepadatan campuran beraspal di beberapa ruas jalan di lokasi studi. Tahap ini berisi evaluasi dan analisis data serta informasi yang diperoleh dari hasil pengamatan, wawancara dan pengujian.
- c. Menyusun rekomendasi untuk memastikan pemenuhan capaian tingkat kepadatan campuran beraspal. Rekomendasi ini diwujudkan dalam bentuk daftar periksa (*checklist*) dan berdasarkan daftar periksa ini dilakukan pendampingan teknis untuk memastikan bahwa semua isi dari daftar periksa dipahami oleh *stakeholder*.

HASIL DAN PEMBAHASAN

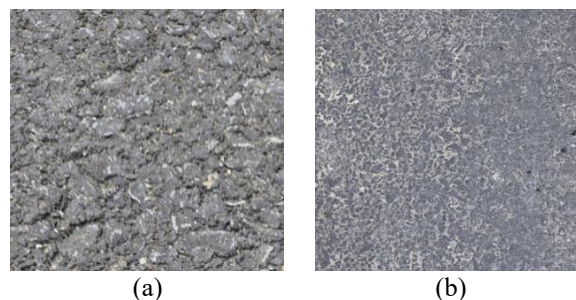
Hasil dan pembahasan dari kegiatan studi evaluasi kepadatan campuran beraspal ini disampaikan menjadi 3 bagian sebagai berikut.

Tahap 1: Inventarisasi Kondisi Perkerasan Jalan

Tahap ini dilakukan melalui serangkaian kegiatan, dimulai dengan melakukan kegiatan: (i) pengamatan kondisi jalan, (ii) kunjungan ke *asphalt mixing plant* (AMP), (iii) wawancara dengan *stakeholders*; (iv) pemeriksaan dokumen dan (v) pengujian kepadatan lapangan.

a. Pengamatan kondisi jalan

Kegiatan survei pendahuluan berupa pengamatan kondisi jalan dan memberikan informasi bahwa permukaan keenam ruas jalan yang ditinjau umumnya dalam kondisi baik dan rata, serta jarang ditemukan kerusakan, dikarenakan kendaraan berat tidak banyak beroperasi di keenam ruas jalan yang ditinjau. Secara visual, kondisi permukaan jalan dapat berbeda (lihat Gambar 1).



Gambar 1. Kondisi permukaan (a) Jalan Tanjung Palas– alimbatu dan (b) Jalan Meranti Buluh Perindu

Hal ini dapat dikarenakan beberapa faktor, seperti besarnya proporsi agregat halus dan terjadinya segregasi. Dari informasi visual ini, indikasi ketidaksesuaian kepadatan masih belum dapat diidentifikasi secara jelas.

b. Kunjungan ke *asphalt mixing plant* (AMP)

Kegiatan inventarisasi kedua adalah mengunjungi tiga *asphalt mixing plant* (AMP), tempat material campuran beraspal yang digunakan untuk kegiatan penanganan jalan diperoleh. Setiap AMP menjadi penyedia bagi material campuran beraspal yang digunakan oleh dua ruas jalan yang dievaluasi, yaitu AMP A (menyediakan campuran beraspal untuk ruas jalan 1 dan 2), AMP B (menyediakan campuran beraspal untuk ruas jalan 3 dan 4) dan AMP C (menyediakan campuran beraspal untuk ruas jalan 5 dan 6).

Kegiatan inventarisasi di AMP dilakukan dengan kegiatan pengamatan dan diskusi dengan karyawan AMP. Namun pada saat kunjungan, seluruh AMP sedang tidak memproduksi campuran beraspal. Saat berkunjung ke AMP B, terdapat temuan bahwa adanya pencampuran agregat kasar dengan agregat halus di dua *cold bin* dan penanganan aspal karung dengan tidak semestinya (terekspose sinar matahari dan tidak disimpan di lokasi penyimpanan) (Gambar 2).



Gambar 2. Temuan di AMP B

Meskipun saat itu AMP sedang tidak berproduksi, namun temuan adanya penanganan material seperti terlihat pada Gambar 2 menunjukkan kurangnya pihak AMP dalam menerapkan *standard operating procedure* (SOP) terkait penanganan material jalan dengan baik. Hal ini dapat berkontribusi secara tidak langsung pada tidak terpenuhinya tingkat kepadatan campuran beraspal (Li *et al.*, 2022).

c. Wawancara dengan stakeholders

Kegiatan wawancara dilakukan dengan pemilik proyek, yaitu Dinas Pekerjaan Umum. Wawancara dengan pihak Dinas Pekerjaan Umum mendapatkan beberapa informasi penting, di antaranya:

- a) Peran pengawas lapangan dan konsultan teknis dipegang oleh orang yang sama;
- b) Rencana Mutu Pekerjaan Konstruksi (RMPK) saat melakukan pekerjaan pengaspalan seringkali diabaikan dan kurang diperhatikan oleh rekanan;
- c) Material agregat kasar tercampur dengan pasir (seperti ditemukan pada *cold bin* di AMP) saat akan digunakan dalam pembuatan campuran beraspal;
- d) Rekanan melakukan pemadatan dengan tidak mengikuti metode pelaksanaan yang tertera pada RMPK, campuran beraspal dipadatkan setelah melakukan penghamparan sejauh 0,5–1 km;
- e) Sebelum melakukan pekerjaan konstruksi jalan, rekanan tidak mengecek kondisi tanah dan lapisan fondasi;
- f) Penggunaan tanah dasar yang tidak sesuai dengan persyaratan;
- g) Terbatasnya jumlah SDM yang kompeten di bidang pengawasan jalan mengakibatkan lemahnya kontrol terhadap kualitas pekerjaan;
- h) Rekanan tidak melakukan *trial mix* berdasarkan *job mix formula* (JMF) sebelum memulai pekerjaan;
- i) Keterbatasan ketersediaan laporan pengendalian mutu (*back-up quality*) menyebabkan kurangnya acuan yang memadai untuk *monitoring* dan pengawasan kegiatan harian;
- j) Rekanan tidak menyerahkan hasil tes laboratorium kepada pemilik proyek sebagai kelengkapan administrasi untuk permohonan pencairan dana; dan
- k) Meskipun rekanan memiliki rekam jejak yang baik saat melaksanakan pekerjaan jalan dengan status yang lebih tinggi, namun hal ini tidak menjadi jaminan bahwa rekanan tersebut dapat memenuhi

ketercapaian tingkat kepadatan pada jalan yang ditinjau.

Di kesempatan lain, wawancara dengan pihak AMP mendapatkan informasi terkait operator alat berat sebagai berikut:

- a) Dalam proyek jalan yang berlangsung malam hari, operator alat berat kerap mengurangi jumlah lintasan pemadatan aspal karena terburu-buru;
- b) Pembagian tugas yang tidak jelas sering membuat seorang operator menangani lebih dari satu alat berat, sehingga konsentrasi terhadap pekerjaan utamanya terpecah.

Hasil wawancara dengan pihak *stakeholders* ini memberikan informasi pendukung yang penting dan mengarahkan pada kemungkinan penyebab ketidaktercapaiannya tingkat kepadatan campuran beraspal.

d. Pemeriksaan dokumen

Pengumpulan dokumen teknis sebagai data sekunder sangat krusial dalam menilai kepadatan campuran beraspal suatu ruas jalan. Dokumen-dokumen ini menjadi fondasi untuk memahami kondisi aktual dan faktor-faktor yang memengaruhi. Meski telah dibantu oleh tim Dinas Pekerjaan Umum, upaya pengumpulan ini hanya berhasil memperoleh satu dari tujuh dokumen yang diperlukan untuk analisis yang lebih mendalam.

Satu-satunya dokumen teknis yang berhasil diperoleh adalah dokumen *job mix formula* (JMF) dan *design mix formula* (DMF). Dokumen ini tidak sesuai dengan yang diharapkan karena dokumen yang diberikan bukanlah dokumen DMF/JMF dari ruas jalan yang dievaluasi. Namun, terdapat temuan menarik dari dokumen DMF/JMF yang diserahkan tersebut, yaitu nilai berat isi laboratorium (γ_{lab}) dan properti Marshall (seperti stabilitas, kelelahan dan parameter rongga) yang tercantum dalam dokumen diambil langsung dari perhitungan grafis properti Marshall, dan bukan dari hasil pengujian empiris berdasarkan nilai kadar aspal optimum (KAO), seperti prosedur baku yang berlaku. Ini menunjukkan bahwa praktik yang berlaku selama ini tidak sesuai dengan prosedur yang berlaku.

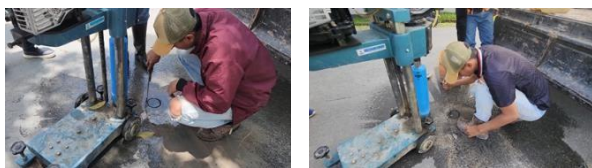
Minimnya ketersediaan dokumen teknis menghambat analisis dalam penelitian ini, khususnya dalam memeriksa kesesuaian prosedur pekerjaan perkerasan jalan dan pemeriksaan nilai kepadatan campuran beraspal.

e. Pengujian tingkat kepadatan

Pemeriksaan kepadatan campuran beraspal dari perkerasan eksisting dilakukan dengan terlebih dahulu mengambil sampel inti dari

perkerasan eksisting menggunakan metode *core drill*. *Core drill* merupakan salah satu metode merusak (*destructive testing*) untuk keperluan pengambilan sampel dari lapisan perkerasan eksisting yang tersusun dari material berpengikat, seperti campuran beraspal, dan sangat bermanfaat untuk keperluan mengevaluasi karakteristik campuran beraspal, dan sekaligus dapat digunakan untuk mengukur ketebalan sesungguhnya dari lapisan beraspal.

Pengambilan sampel inti dilakukan pada titik-titik di keenam ruas jalan yang telah ditentukan berdasarkan hasil diskusi dengan Dinas Pekerjaan Umum (lihat Gambar 3 dan 4, serta Tabel 1). Titik-titik ini dipilih dengan cermat untuk mewakili variasi sumber material dari ketiga *asphalt mixing plant* (AMP) yang ada di lokasi studi. Pada masing-masing ruas jalan tinjauan, *core drill* dilakukan dua kali, di sisi kanan dan kiri, untuk memastikan akurasi dan konsistensi data terkait kondisi lapisan perkerasan.



Gambar 3. Pengambilan sampel *core* di ruas jalan 2 dan ruas jalan 3

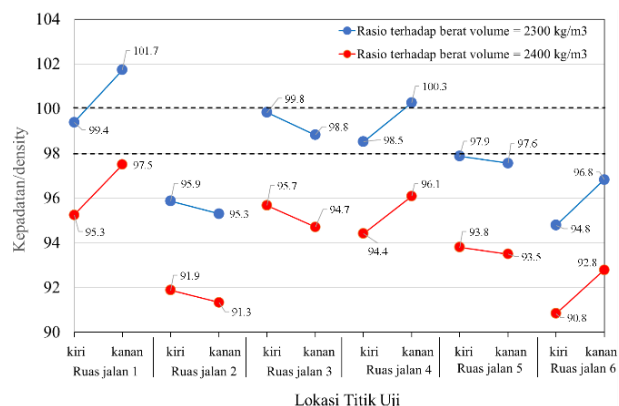


Gambar 4. Sampel *core* dari seluruh ruas jalan tinjauan

Tabel 1. Pemeriksaan ketebalan sampel campuran beraspal hasil *coring*

No	Ruas Jalan (Sisi Kiri/Kanan)	Tebal rata-rata (cm)	Selisih Tebal Antar Sisi (cm)
1	Ruas jalan 1 (kiri)	6,03	0,83
	Ruas jalan 2 (kanan)	5,20	
2	Ruas jalan 2 (kiri)	7,57	0,03
	Ruas jalan 2 (kanan)	7,53	
3	Ruas jalan 3 (kiri)	7,30	0,80
	Ruas jalan 3 (kanan)	6,50	
4	Ruas jalan 4 (kiri)	7,83	1,40
	Ruas jalan 4 (kanan)	9,32	

5	Ruas jalan 5 (kiri)	5,17	1,03
	Ruas jalan 5 (kanan)	6,20	
6	Ruas jalan 6 (kiri)	4,93	0,33
	Ruas jalan 6 (kanan)	5,27	



Gambar 5. Nilai kepadatan (*density*) pada ruas jalan yang dievaluasi

Tabel 1 mengindikasikan bahwa secara keseluruhan, sampel inti memiliki tebal yang bervariasi, dengan sampel inti dari ruas jalan 2 dan 4 memiliki tebal yang cukup besar, sedangkan sampel inti dari ruas jalan 6 memiliki tebal yang paling kecil. Namun, terdapat ruas jalan dengan selisih tebal campuran beraspal di sisi kiri dan kanan yang cukup besar, yaitu pada ruas jalan 4 dan 5. Selisih tebal yang cukup besar mungkin tidak akan terjadi pada suatu ruas jalan karena penentuan tebal sudah ditentukan sebelumnya berdasarkan *trial compaction* (Beainy et al., 2014). Alasan selisih tebal yang besar ini tidak dijelaskan karena tidak ada dokumen *as built drawing* yang tersedia untuk mendukung temuan ini.

Gambar 5 menunjukkan nilai kepadatan (*density*) dari sampel yang diambil dari sisi kiri dan kanan keenam ruas jalan yang dievaluasi. Acuan yang digunakan untuk pemenuhan nilai kepadatan (*density*) adalah lebih besar atau sama dengan 98% (Direktorat Jenderal Bina Marga, 2020). Nilai kepadatan pada Gambar 5 dihitung dengan membandingkan berat isi sampel inti dari hasil *core drill* (γ_{lab}) terhadap berat isi campuran beraspal di laboratorium (γ_{lab}) yang dimiliki oleh masing-masing AMP sebagai penyedia campuran beraspal. Namun, data berat isi γ_{lab} dari masing-masing penyedia tidak tersedia, sehingga nilai γ_{lab} untuk perhitungan kepadatan pada Gambar 5 diasumsikan menggunakan nilai γ_{lab} tipikal antara 2.300 kg/m³ dan 2.400 kg/m³.

Pada Gambar 5, evaluasi nilai kepadatan dapat dilakukan berdasarkan dua pendekatan, yaitu: pertama, selisih nilai kepadatan berdasarkan dua nilai berat isi γ_{lab} (misalnya pada ruas jalan 1 sisi kiri, nilai kepadatan yang mungkin adalah antara 95,3% dan 99,4%). Berdasarkan pendekatan ini, apabila dibandingkan

kepadatan menurut spesifikasi (Direktorat Jenderal Bina Marga, 2020) lebih besar atau sama dengan 98%, terdapat tiga ruas jalan yang memiliki kemungkinan dapat memenuhi spesifikasi, yaitu ruas jalan 1, 3 dan 4. Penyebutan “memiliki kemungkinan” dikarenakan tidak diketahuinya nilai berat isi yang sebenarnya dari hasil pengujian di laboratorium (γ_{lab}), sehingga apabila nilai berat isi γ_{lab} di sekitar 2.300 kg/m^3 , maka kepadatannya dapat memenuhi spesifikasi. Namun apabila berat isi γ_{lab} mendekati 2.400 kg/m^3 maka kepadatannya tidak dapat memenuhi ketentuan di spesifikasi.

Di sisi lain, ketiga ruas jalan lain, yaitu ruas jalan 2, 5 dan 6, memiliki nilai kepadatan yang lebih rendah dari nilai kepadatan menurut spesifikasi, baik apabila digunakan berat isi γ_{lab} 2.300 kg/m^3 atau 2.400 kg/m^3 untuk menghitung kepadatan. Hal ini menunjukkan bahwa kepadatan di ketiga ruas jalan ini secara pasti tidak memenuhi persyaratan yang ditentukan di dalam spesifikasi.

Kedua, selisih nilai kepadatan yang merupakan absolut selisih kepadatan antara dua sisi jalan, yaitu sisi kiri dan sisi kanan (misalnya pada ruas jalan 1 sisi kiri dan kanan, masing-masing memiliki kepadatan sebesar 95,3% dan 97,5%, apabila menggunakan berat isi 2.300 kg/m^3 dan 99,4% dan 101,7%, apabila menggunakan berat isi 2.400 kg/m^3 . Sehingga perbedaan kepadatan untuk kedua sisi adalah 2,3%).

Hasil perhitungan kepadatan menunjukkan bahwa nilai kepadatan untuk setiap sisi dari ruas jalan bervariasi, dengan selisih nilai kepadatan antar sisi yang relatif kecil (seperti pada ruas jalan 5, yaitu kurang dari 0,50%) sampai selisih nilai kepadatan yang cukup besar, yaitu sama dengan atau lebih besar dari 2,00% (seperti di ruas jalan 1 dan 6). Tingginya selisih kepadatan antara sisi kiri dan kanan dari ruas jalan yang ditinjau adalah hal yang perlu dikritisi karena kepadatan di satu ruas jalan seharusnya memiliki nilai yang relatif sama atau memiliki selisih kepadatan yang kecil, apabila ruas jalan tersebut dikerjakan oleh penyedia jasa yang sama dan pada waktu yang bersamaan.

Tahap 2: Analisis Penyebab Permasalahan Ketidaktercapaian Tingkat Kepadatan Campuran Beraspal

a. Evaluasi kepadatan sampel *core drill*

Hasil perhitungan kepadatan sampel inti dengan cara *core drill* memperlihatkan bahwa terdapat variasi nilai kepadatan dari kedua belas sampel inti yang diperoleh dari enam ruas jalan yang ditinjau, yang menunjukkan bahwa terdapat sampel inti yang mampu memenuhi spesifikasi (Direktorat Jenderal Bina Marga, 2020), yaitu lebih besar atau sama dengan 98%, dan ada yang sampel inti yang nilai kepadatannya di atas atau di bawah spesifikasi. Ketidaktercapaian nilai kepadatan terhadap spesifikasi sebenarnya harus

ditinjau secara menyeluruh, mulai dari proses pengadaan material, proses pembuatan campuran beraspal dan proses penghamparan serta pemadatan di lapangan. Dikarenakan tidak diperolehnya dokumen teknis yang mencakup seluruh proses ini, maka evaluasi hanya bisa dibuat berdasarkan informasi yang dikumpulkan dari hasil pengamatan dan wawancara dengan pemangku kepentingan (*stakeholders*) dan para narasumber.

Dari hasil pengamatan dan wawancara, serta diperkaya dengan masukan dari para narasumber, proses ketidaktercapaian tingkat kepadatan campuran beraspal telah dimulai dari permasalahan yang terjadi sejak proses pengadaan dan penyimpanan material sampai dengan proses pemadatan campuran beraspal. Uraian singkat dari setiap proses disajikan sebagai berikut:

a) Proses pengadaan dan penyimpanan material

- Material agregat yang digunakan pada campuran beraspal umumnya menggunakan empat fraksi, yaitu agregat ukuran 1 inch, $\frac{1}{2}$ inch, abu batu dan pasir, yang ditampung pada empat *cold bin* (Kementerian Pekerjaan Umum Republik Indonesia, 2007). Pada ketiga *asphalt mixing plant* (AMP) yang ditinjau pada lokasi studi, hanya terdapat tiga *bin* dingin (*cold bin*) yang berisi tiga fraksi, yaitu ukuran 1 inch, $\frac{1}{2}$ inch dan abu batu. Satu rekanan ditemukan kurang memerhatikan penyimpanan setiap fraksi agregat dengan baik, sehingga fraksi agregat kasar dan abu batu bercampur dengan pasir. Dengan pengaturan bukaan *bin* dingin yang telah direncanakan, adanya pencampuran antar fraksi agregat ini dapat menyebabkan, komposisi agregat pada saat pencampuran dapat menjadi tidak terkontrol sehingga terjadi ketidaksesuaian antara gradasi campuran agregat di AMP dan gradasi yang ditetapkan di dalam DMF/JMF.
- Untuk material aspal, satu rekanan menyimpan aspal karung tidak pada tempatnya (yaitu pada tempat yang tertutup dan terhindar dari cuaca/panas), sehingga perubahan karakteristik dari aspal yang digunakan dapat terjadi sebelum aspal tersebut digunakan untuk membuat campuran beraspal (Islam *et al.*, 2021).

b) Proses pembuatan campuran beraspal di AMP

- Campuran beraspal di AMP dibuat dengan tidak melakukan *trial mix* oleh rekanan karena tidak ada keharusan untuk melakukan *trial mix* berdasarkan dokumen JMF. Selain itu, dokumen yang melaporkan *trial compaction* juga tidak tersedia, padahal dokumen ini penting untuk mengetahui tebal lapisan padat yang dituju serta berapa banyak lintasan yang akan digunakan untuk memperoleh nilai kepadatan yang dikehendaki.
- Penggunaan dokumen DMF/JMF yang tidak sesuai sebagai dokumen referensi dimungkinkan untuk penilaian hasil pekerjaan di lapangan (seperti nilai kepadatan), hal ini di antaranya dikarenakan: tidak tersedianya dokumen DMF terbaru dari campuran beraspal yang digunakan untuk lokasi ruas jalan tertentu; dokumen DMF dari campuran beraspal untuk jalan yang sama pada tahun yang lampau dianggap masih relevan; dan dokumen DMF dikeluarkan oleh perusahaan yang sama dan memproduksi campuran beraspal dengan menggunakan material dari sumber yang sama (meskipun pada kenyataannya sumber material dapat berbeda). Penggunaan dokumen DMF/JMF yang tidak sesuai ini akan menjadikan penilaian hasil pekerjaan di lapangan menjadi bias, sehingga fungsi penjaminan mutu menggunakan dokumen DMF/JMF menjadi tidak berjalan. Selain itu, tidak tersedianya dokumen DMF/JMF dan dokumen teknis lainnya secara lengkap akan mempersulit proses pengawasan dan pemeriksaan di masa mendatang, jika diperlukan.

c) Proses penghamparan dan pemadatan

- Sebelum dilakukan proses penghamparan dan pemadatan, tidak ada upaya untuk mengecek kondisi perkerasan lentur eksisting, dikarenakan secara visual, tidak terdapat kerusakan yang berarti. Namun, besarnya daya dukung sisa dari perkerasan harus ditentukan melalui pengukuran atau pengujian.
- Tidak ada dokumen Rencana Mutu Pekerjaan Konstruksi (RMPK) yang dapat ditunjukkan pada penelitian ini.

Hal ini mengindikasikan bahwa pelaksanaan penghamparan dan pemadatan dilakukan dengan tidak mengikuti metode pelaksanaan yang telah ditetapkan di dalam dokumen. Banyaknya dokumen yang tidak tersedia seharusnya menjadi perhatian dari pengawas lapangan, namun fungsi pengawasan terhadap pekerjaan penghamparan dan pemadatan tidak berjalan sebagaimana mestinya karena pada praktiknya, petugas pengawas lapangan merupakan orang yang sama dengan orang yang melakukan pekerjaan perencanaan teknis. Laporan pengendalian mutu (*back-up quality*) yang dibuat petugas pengawas umumnya bersifat sangat terbatas, sehingga sulit digunakan untuk kegiatan *monitoring* dan pengawas kegiatan harian.

- Tidak dilakukannya evaluasi berupa pengujian material dan pemeriksaan terhadap hasil pekerjaan jalan. Evaluasi ini sangat diperlukan untuk memastikan seluruh hasil pekerjaan baik dan sesuai dengan dokumen kontrak dan laporan Rencana Mutu Pekerjaan Konstruksi (RMPK) guna data pendukung untuk mengajukan pencairan dana ke pemilik proyek. Pada kasus kajian ini, terdapat rekanan yang diduga tidak melakukan pemeriksaan dan pengujian terhadap ruas jalan yang telah dikerjakan sehingga tidak dapat dipastikan apakah hasil pekerjaan yang telah dilakukan sesuai dengan rencana yang dibuat.
- Adanya indikasi jumlah aspal yang tidak memadai, gradasi yang kurang sesuai dengan spesifikasi, dan tingkat kepadatan tidak memenuhi. Hal ini didasarkan pada tampilan visual beberapa sampel yang menunjukkan dimensi agregat yang cukup besar, warna yang lebih dominan abu-abu daripada hitam (jumlah aspal kurang memadai), serta ketebalan dan kepadatan sampel uji yang kurang.

Setiap proses mengindikasikan bahwa kegagalan pencapaian tingkat kepadatan tidak bersifat saling lepas/independen, namun dapat merupakan kontribusi dari kegagalan pada tahap sebelumnya. Hal ini menunjukkan runtuhnya sistem manajemen mutu secara keseluruhan, mulai dari perencanaan, pengadaan material,

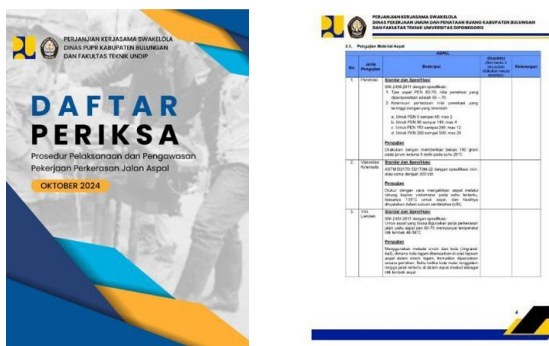
produksi, pelaksanaan, hingga pengawasan dan verifikasi.

Runtuhnya sistem manajemen mutu tersebut merepresentasikan pelanggaran struktural terhadap kode etik profesi, yang bersumber dari degradasi moralitas baik individu maupun kolektif. Setiap penyimpangan dari prosedur, standar, dan spesifikasi bukan sekadar kelalaian teknis, melainkan bentuk nyata pengabaian terhadap prinsip fundamental profesi: kompetensi, kejujuran, akuntabilitas dan tanggung jawab kepada publik. Oleh karena itu, upaya perbaikan tidak dapat hanya bersifat teknis, tetapi harus didasari oleh reformasi etika profesi yang diwujudkan melalui mekanisme pengawasan mutu yang independen, ketat dan akuntabel. Hanya dengan pendekatan integratif ini kegagalan pencapaian kepadatan campuran beraspal dapat diminimalkan secara berkelanjutan.

Menyusun Rekomendasi Untuk Memastikan Pemenuhan Capaian Tingkat Kepadatan Campuran Beraspal

a. Penyusunan daftar periksa (*checklist*)

Penyusunan daftar periksa (*checklist*) tahapan pelaksanaan pekerjaan perkerasan jalan (Gambar 6) dilakukan sebagai bagian dari upaya memastikan bahwa setiap tahap pekerjaan memenuhi standar kualitas secara teknis yang ditetapkan serta mendukung keselamatan dan keberlanjutan infrastruktur jalan. Daftar periksa ini berfungsi sebagai panduan yang komprehensif dan terstandarisasi bagi tim teknis di lapangan dalam melaksanakan pengujian mutu serta pemantauan proses pelaksanaan, sehingga memastikan kualitas dan keandalan lapisan aspal yang digunakan sesuai dengan spesifikasi yang telah ditentukan. Dengan adanya *checklist* ini diharapkan kualitas pekerjaan konstruksi jalan di lokasi studi dapat meningkat, menghasilkan jalan yang lebih tahan lama dan berfungsi optimal sesuai kebutuhan pengguna.



Gambar 6. Daftar periksa prosedur pelaksanaan dan pengawasan pekerjaan perkerasan jalan aspal

Daftar Periksa (*checklist*) disusun untuk memberikan panduan dalam Pelaksanaan dan Pengawasan Pekerjaan Perkerasan Jalan Aspal, mulai dari penyiapan material, pencampuran material, penghamparan dan pengendalian kualitas perkerasan aspal. Daftar ini disusun berdasarkan standar pengujian dan spesifikasi yang sudah ditetapkan oleh Bina Marga, serta dilengkapi informasi Dokumen Teknis yang harus disiapkan oleh rekanan penyelenggara Pelaksanaan dan Pengawasan Pekerjaan Perkerasan Jalan Aspal. Di dalam daftar periksa ini, disusun menjadi 5 bagian yaitu:

- Bagian I: Penjelasan Umum
Bagian ini menyajikan penjelasan umum mengenai aspek-aspek apa saja yang perlu diperiksa dan standar pengujian serta spesifikasi yang digunakan sebagai acuan pengujian maupun pelaksanaan.
- Bagian II: Daftar Pemeriksaan Material
Bagian ini berisi tentang pemeriksaan karakteristik material penyusun perkerasan jalan aspal, meliputi material aspal, agregat dan campuran beraspal. Pengujian karakteristik material aspal meliputi 9 pengujian; material agregat dilakukan 7 pengujian untuk agregat kasar, 5 pengujian untuk agregat halus, dan pengujian untuk campuran beraspal.
- Bagian III: Daftar Pemeriksaan *Asphalt Mixing Plant* (AMP)
Proses pencampuran agregat dan aspal di AMP perlu mendapat perhatian untuk menghasilkan campuran beraspal yang sesuai dengan spesifikasi yang diinginkan. Kegiatan pemeriksaan peralatan dalam AMP mencakup beberapa komponen: *bin* dingin, *elevator* dingin, pengering (*dryer*), kolektor debu, kolektor unit ayakan, penyimpanan aspal panas, *elevator* panas, pengendali gradasi, *bin* panas, pencampur dan *hopper* pencurah/pemuat.
- Bagian IV: Daftar Pemeriksaan Penghamparan dan Pengendalian Mutu Perkerasan Jalan Aspal
Proses penghamparan dan pengendalian mutu perkerasan jalan aspal mencakup kegiatan-kegiatan: pemeriksaan *job mix formula* (JMF), pemeriksaan *setting* AMP, pemeriksaan pengujian pemadatan lapangan (*trial compaction*), dan pemeriksaan penghamparan dan pemadatan di lapangan.
- Bagian V: Kelengkapan Dokumen Teknis
Kelengkapan dokumen menjadi sumber informasi bagi pemeriksa untuk

mengetahui hal-hal apa saja yang sudah dilakukan oleh pelaksana pekerjaan perkerasan jalan aspal. Dengan memastikan bahwa seluruh dokumen teknis telah tercentang (sudah dilengkapi), maka dapat diperkirakan bahwa seluruh prosedur sudah dilaksanakan dan dilaporkan. Dokumen teknis yang diperlukan meliputi:

- hasil pengujian karakteristik material aspal yang dilakukan,
- hasil pengujian karakteristik material agregat yang dilakukan,
- hasil pengujian karakteristik tanah dasar yang dilakukan
- laporan harian, laporan mingguan dan laporan bulanan
- laporan Rencana Mutu Pekerjaan Konstruksi (RMPK)
- laporan kendali mutu (*quality control*)
- laporan *back up quality* dan *back up quantity*
- laporan *design mix formula* (JMD)
- laporan *job mix formula* (JMF)
- kurva S

b. Pendampingan teknis

Selain penyusunan daftar periksa, pendampingan teknis (Gambar 7) turut dilakukan untuk memastikan bahwa semua *stakeholder* yang menerima daftar periksa (pemilik proyek, kontraktor, konsultan dan pihak AMP) memahami penggunaannya dan membuka diskusi apabila ada pertanyaan tentang seluruh proses yang harus dilakukan untuk memastikan bahwa hasil akhir berupa tingkat kepadatan campuran beraspal dapat memenuhi spesifikasi yang disyaratkan. Pendampingan teknis ini juga berfungsi untuk penyamaan persepsi antar *stakeholders* akan teknis pelaksanaan pekerjaan perkerasan jalan, sehingga diharapkan dengan adanya persepsi yang sama dan dibekali dengan daftar periksa, maka setiap *stakeholder* mempunyai tanggung jawab masing-masing dan secara bersama dapat mengontrol pelaksanaan pekerjaan, serta mengkoreksi apabila terdapat ketidaksesuaian dalam pelaksanaannya.



Gambar 7. Kegiatan pendampingan teknis

Beberapa hal yang dapat dirangkum dari kegiatan pendampingan teknis adalah sebagai berikut:

1. Terdapat kesalahan persepsi dari pihak AMP bahwa pihak AMP hanya menjual campuran aspal atau menyewakan alat pemadat kepada kontraktor, dan tidak perlu mengetahui bagaimana campuran beraspal tersebut dihindarkan dan dipadatkan, serta tidak perlu mengetahui apakah kepadatan dari campuran aspal di lapangan dapat tercapai atau tidak. Padahal, ketidaktercapaian kepadatan di lapangan seringkali berujung pada anggapan bahwa campuran aspal yang disediakan oleh pihak AMP kurang baik. Selain itu, pemahaman juga diberikan mengenai proses pembuatan campuran beraspal di AMP, transportasi campuran aspal ke lokasi proyek, penghamparan dan pemadatan harus bersifat menerus. Setiap pihak pada setiap proses harus memahami kondisi pada proses sebelumnya dan bertanggung jawab pada pelaksanaan proses yang menjadi tanggung jawabnya. Yang tidak kalah penting adalah setiap proses harus mengacu pada pedoman dan ketentuan yang berlaku, dan diakhir proses harus dilengkapi dengan dokumen laporan pelaksanaan proses tersebut sebagai bagian dari penjaminan mutu.

Untuk campuran aspal panas, komposisinya harus tepat, dan temperatur harus selalu dijaga agar sesuai dengan ketentuan saat penghamparan dan pemadatan. Perlu mendapat perhatian bahwa pada saat transportasi temperatur material campuran aspal panas akan selalu mengalami penurunan (Muhammad et al., 2019). Oleh karena itu, untuk memperlambat penurunan suhu, truk pengangkut campuran aspal panas harus tertutup terpal dan betul-betul harus diperhitungkan jarak antara AMP dan proyek (terkait dengan waktu penghamparan), serta kondisi cuaca (terkait dengan suhu udara). Pihak AMP dapat berkontribusi untuk turut menjaga kualitas campuran aspal yang dikirim ke lokasi pada tahap ini.

Selain itu, banyaknya jumlah lintasan pemadatan di lapangan harus mengikuti jumlah lintasan pemadatan yang disepakati dari hasil *trial compaction*, begitu juga tebal gembur (tebal sebelum dipadatkan)

dan jenis alat pemadat yang digunakan. Pada tahap ini, konsultan pengawas harus diaktifkan karena konsultan pengawas bertugas untuk mencatat setiap detail dari proses yang telah dilakukan berikut hasil dari pekerjaan lapangan, serta memiliki peranan yang sangat penting untuk memastikan semua proses yang dilakukan di lapangan telah sesuai dengan persyaratan.

Untuk keperluan praktis, kepadatan campuran aspal di lapangan yang tidak sesuai dengan persyaratan lebih besar dari 98% sebenarnya tidak menjadi masalah untuk jalan-jalan kabupaten di lokasi studi, selama kondisi lalu lintas (*traffic*) masih rendah (dengan jumlah truk yang melintas masih sedikit), namun akan menjadi masalah apabila di masa mendatang terdapat kenaikan jumlah truk yang melintas pada jalan-jalan dengan nilai kepadatan yang kurang tersebut karena akan mempercepat kerusakan jalan. Dan peningkatan jumlah truk ini sering sulit diprediksi.

2. Semua pihak yang terlibat dalam pemenuhan persyaratan kepadatan campuran aspal pada ruas jalan di lokasi studi mengakui bahwa proses pelaksanaan konstruksi adalah kegiatan yang selama ini menjadi prioritas, sedangkan pemeriksaan kepadatan campuran aspal adalah tahap yang belum banyak dilakukan, ditambah lagi tidak berjalannya pengawasan untuk kegiatan lapangan sehingga kualitas campuran beraspal, dalam hal ini nilai kepadatannya, menjadi terabaikan. Untuk ke depan, lemahnya pengawasan di setiap tahapan (di AMP, dan di lapangan oleh pihak konsultan pengawas lapangan) menjadi salah satu titik lemah yang perlu dibenahi.
3. Penggunaan pasir yang cukup besar di campuran aspal perlu mendapat perhatian khusus, karena terdapat pembatasan di dalam spesifikasi mengenai jumlah maksimum pasir yang diperbolehkan digunakan dalam campuran aspal. Banyaknya pasir dalam campuran beraspal akan berpengaruh terhadap gradasi agregat, meskipun secara berat isi, seharusnya pengaruhnya kecil antara penggunaan abu batu atau pasir dalam campuran aspal. Selain itu, hal lain yang perlu mendapat perhatian adalah mengenai

besarnya nilai penyerapan aspal dari pasir dan abu batu.

Meskipun minim dokumen *back-up quality* dan *back-up quantity*, poin (1) dan (2) dari hasil pendampingan teknis ini semakin menguatkan temuan dari hasil wawancara dan pengujian sampel campuran beraspal bahwa ketidaktercapaian tingkat kepadatan dikonstruksikan sejak dari penyediaan dan penyimpanan material sampai dengan proses penghamparan dan pemadatan. Penyediaan daftar periksa (*checklist*) diharapkan dapat memberikan penyamaan persepsi akan langkah-langkah apa saja yang harus dilakukan oleh pihak penyedia jasa untuk memastikan pemenuhan tingkat kepadatan campuran beraspal. Selain itu, pengawasan dari pihak pemberi tugas maupun pihak eksternal yang independen, ketat dan akuntabel sangat diperlukan untuk memastikan pihak penyedia jasa mematuhi dan memenuhi semua item di dalam daftar periksa, serta melaksanakan pekerjaan penanganan jalan dengan menjunjung tinggi moral dan etika profesi.

KESIMPULAN

Penelitian ini menyajikan evaluasi mengenai fenomena tidak tercapainya kepadatan campuran beraspal pada jalan perkerasan lentur, dengan mengambil studi kasus pada ruas jalan-ruas jalan di salah satu Kabupaten Kota di Provinsi Kalimantan Utara. Pengumpulan data dilakukan menggunakan metode pengamatan, wawancara dan pengambilan sampel lapangan, serta pengujian di laboratorium. Hasil pengujian sampel membuktikan bahwa terdapat ketidaktercapaian tingkat kepadatan dari beberapa ruas jalan yang dievaluasi. Ketidaktercapaian tingkat kepadatan ini dikonstruksikan oleh banyak faktor, terutama kelemahan akan pemahaman dari pihak penyedia jasa, lemahnya pengawasan dan minimnya upaya pendokumentasian proses dan hasil dari pekerjaan perkerasan jalan, baik dari tahap penyiapan dan penyimpanan material, proses pembuatan campuran beraspal, sampai dengan kegiatan penghamparan dan pemadatan di lapangan. Solusi dari permasalahan ini adalah penyediaan daftar periksa (*checklist*) yang akan membantu pihak penyedia jasa untuk memahami semua langkah yang harus dikerjakan untuk mendapatkan tingkat kepadatan yang sesuai dengan spesifikasi, serta pengawasan dari pihak pemberi tugas maupun pihak eksternal yang independen, ketat dan akuntabel untuk menjamin pihak penyedia jasa memenuhi semua item dalam daftar periksa dan melaksanakan pekerjaan dengan menjunjung tinggi moral dan etika profesi.

UCAPAN TERIMA KASIH

Terima kasih disampaikan kepada Fakultas Teknik Undip yang telah mendanai keberlangsungan penelitian ini.

DAFTAR PUSTAKA

- Beainy, F., Singh, D., Commuri, S., & Zaman, M. (2014). Laboratory and field study on compaction quality of an asphalt pavement. *International Journal of Pavement Research and Technology*, 7(5), 317. doi:10.6135/IJPRT.ORG.TW/2014.7(5).317.
- Di Maddaloni, F., & Davis, K. (2017). The influence of local community stakeholders in megaprojects: Rethinking their inclusiveness to improve project performance. *International journal of project management*, 35(8), 1537-1556. doi:10.1016/J.IJPROMAN.2017.08.011.
- Direktorat Jenderal Bina Marga. (2020). *Spesifikasi Umum Jalan dan Jembatan Revisi 2*. Kementerian Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat.
- Islam, S. S., Singh, S. K., Ransinchung, G. D., & Ravindranath, S. S. (2021). Effect of property deterioration in SBS modified binders during storage on the performance of asphalt mix. *Construction and building materials*, 272, 121644. doi:10.1016/J.CONBUILDMAT.2020.121644.
- Kamaludin, T. M., Patunrangi, J., & Renata, B. D. (2025). Analysis of Factors Influencing Asphalt Pavement Work Quality in the Bungku – Bahodopi – Southeast Sulawesi Border Road Preservation Project. *Engineering And Technology Journal*, 10(6), pp. 5416–5424. doi:10.47191/ETJ/V10I06.13.
- Kementerian Pekerjaan Umum Republik Indonesia. (2007). *Pedoman pelaksanaan lapis campuran beraspal panas*, pp. 1–42.
- Li, W., Cao, W., Ren, X., Lou, S., Liu, S., & Zhang, J. (2022). Impacts of aggregate gradation on the volumetric parameters and rutting performance of asphalt concrete mixtures. *Materials*, 15(14), 4866. doi:10.3390/MA15144866.
- Muhammad, Syuhada, A., Huzni, S., & Fuadi, Z. (2019, May). Study of temperature loss of Hot Mix Asphalt during transportation. In *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* (Vol. 523, No. 1, p. 012083). IOP Publishing. doi:10.1088/1757-899X/523/1/012083.
- Mulyono, A. T. (2006). Kinerja Pemberlakuan Standar Mutu Perkerasan pada Peningkatan dan Pemeliharaan Jalan Nasional–Propinsi. *Media Komunikasi Teknik Sipil*, 14(3), 309-328. doi:10.14710/MKTS.V14I3.3956.
- Rahangdale, G., & Nigam, S. (2020). Engineering attributes affecting quality of road construction. *International Journal of Engineering Applied Sciences and Technology*, 5(7), 242-247. doi:10.33564/ijeast.2020.v05i07.037.
- Rotimi, A. (2024). A Review Of Road Pavement Failure: A Case Study Of Nigerian Road. *Advanced Journal of Science, Technology and Engineering*, 4(2), 8-23. doi:10.52589/ajste-mvcd6edz.