



BUKU REFERENSI

KONSTRUKSI PERKERASAN JALAN

STANDAR, MATERIAL, DAN TEKNIK LAPANGAN

Ir. Muhammad Rizka Fadli Wibowo, S.T., M.T.

Ir. Hj. Lindawati, MZ., S.T., M.T.

Ir. Balqis Fataya Said, S.T., M.T.

BUKU REFERENSI

KONSTRUKSI PERKERASAN JALAN STANDAR, MATERIAL, DAN TEKNIK LAPANGAN

Ir. Muhammad Rizka Fadli Wibowo, S.T., M.T.

Ir. Hj. Lindawati, MZ., S.T., M.T.

Ir. Balqis Fataya Said, S.T., M.T.



KONSTRUKSI PERKERASAN JALAN

STANDAR, MATERIAL, DAN TEKNIK LAPANGAN

Ditulis oleh:

Ir. Muhammad Rizka Fadli Wibowo, S.T., M.T.

Ir. Hj. Lindawati, MZ., S.T., M.T.

Ir. Balqis Fataya Said, S.T., M.T.

Hak Cipta dilindungi oleh undang-undang. Dilarang keras memperbanyak, menerjemahkan atau mengutip baik sebagian ataupun keseluruhan isi buku tanpa izin tertulis dari penerbit.



ISBN: 78-634-7305-43-5
IV + 225 hlm; 18,2 x 25,7 cm.
Cetakan I, Agustus 2025

Desain Cover dan Tata Letak:
Melvin Mirsal

Diterbitkan, dicetak, dan didistribusikan oleh

PT Media Penerbit Indonesia

Royal Suite No. 6C, Jalan Sedap Malam IX, Sempakata

Kecamatan Medan Selayang, Kota Medan 20131

Telp: 081362150605

Email: ptmediapenerbitindonesia@gmail.com

Web: <https://mediapenerbitindonesia.com>

Anggota IKAPI No. 088/SUT/2024



KATA PENGANTAR

Perkerasan jalan merupakan elemen vital dalam sistem transportasi darat yang berperan penting dalam mendukung kelancaran mobilitas manusia dan distribusi barang. Di era pembangunan infrastruktur yang semakin pesat, kebutuhan akan sistem jalan yang kuat, tahan lama, dan efisien menjadi semakin mendesak. Oleh karena itu, pemahaman mendalam mengenai berbagai jenis perkerasan, standar desain, material penyusun, serta teknik konstruksi lapangan sangat diperlukan untuk menjamin kualitas dan keberlanjutan infrastruktur jalan.

Buku referensi “Konstruksi Perkerasan Jalan: Standar, Material, dan Teknik Lapangan” membahas berbagai aspek penting dalam konstruksi jalan, yang meliputi fungsi dan jenis perkerasan, standar dan spesifikasi teknis, serta karakteristik dan pemilihan material seperti tanah dasar, agregat, aspal, dan beton. Selain itu, buku referensi ini membahas metode perencanaan struktur perkerasan, teknik pelaksanaan perkerasan lentur dan kaku, sistem drainase jalan, serta evaluasi mutu dan pengujian lapangan. Buku referensi ini juga membahas strategi pemeliharaan dan rehabilitasi jalan guna memastikan keberlanjutan infrastruktur.

Semoga buku referensi ini dapat memberikan kontribusi nyata dalam pengembangan pengetahuan dan keterampilan di bidang konstruksi perkerasan jalan, serta menjadi pedoman yang bermanfaat bagi mahasiswa, praktisi, dan seluruh pihak yang terlibat dalam pembangunan infrastruktur yang berkelanjutan dan berkualitas.

Salam hangat.

TIM PENULIS



DAFTAR ISI

KATA PENGANTAR	i
DAFTAR ISI	ii

BAB I	PENDAHULUAN KONSTRUKSI PERKERASAN JALAN	1
A.	Fungsi Jalan dalam Sistem Transportasi	1
B.	Jenis-jenis Perkerasan Jalan.....	4
C.	Komponen Struktur Perkerasan Jalan.....	8
BAB II	STANDAR DAN SPESIFIKASI TEKNIS PERKERASAN JALAN	15
A.	Standar Nasional	15
B.	Spesifikasi Umum dan Teknis Material	19
C.	Kriteria Desain Perkerasan Menurut Standar	23
BAB III	KARAKTERISTIK DAN PEMILIHAN MATERIAL	27
A.	Tanah Dasar dan Stabilisasi Tanah.....	27
B.	Agregat (Kasar dan Halus): Sifat Fisik dan Mekanis	32
C.	Aspal: Jenis, Sifat, dan Pengujian.....	36
D.	Semen dan Beton untuk Perkerasan Kaku	42
E.	Material Tambahan dan Daur Ulang	47
BAB IV	PERENCANAAN STRUKTUR PERKERASAN JALAN	55
A.	Analisis Lalu Lintas dan Beban Kendaraan.....	55
B.	Karakteristik <i>Subgrade</i> dan CBR	60
C.	Metode Desain	66
D.	Perkerasan Lentur Vs. Perkerasan Kaku	70
BAB V	PERSIAPAN DAN PEKERJAAN TANAH DASAR... ..	77
A.	Pembersihan dan Perataan Area Kerja	77
B.	Pemadatan dan Pengujian Kepadatan	81

C.	Drainase Tanah Dasar	87
D.	Stabilisasi Tanah	90
 BAB VI TEKNIK PELAKSANAAN PERKERASAN LENTUR		
		97
A.	Lapisan Pondasi Bawah dan Atas (Subbase dan <i>Base Course</i>)	97
B.	Pelaksanaan Lapisan Aspal.....	100
C.	Alat Berat yang Digunakan	104
D.	Pengujian Mutu Lapangan.....	110
 BAB VII TEKNIK PELAKSANAAN PERKERASAN KAKU		
		115
A.	Konstruksi Pelat Beton	115
B.	Perkuatan dengan Tulangan.....	121
C.	<i>Expansion Joint</i> dan <i>Contraction Joint</i>	127
D.	Finishing Permukaan Beton dan Curing.....	131
E.	Pengujian Mutu Beton (<i>Slump Test</i> , Kuat Tekan)	136
 BAB VIII DRAINASE JALAN DAN PENGENDALIAN AIR...		
		141
A.	Sistem Drainase Permukaan dan Bawah Permukaan	141
B.	Peran Drainase terhadap Umur Perkerasan	147
C.	Desain dan Pelaksanaan Saluran Drainase	152
 BAB IX EVALUASI MUTU DAN PENGUJIAN LAPANGAN		
		159
A.	Uji Kepadatan Tanah (<i>Sand Cone</i> , <i>Nuclear Density</i>).....	159
B.	Uji Ketebalan Lapisan	164
C.	Marshall Test dan Uji Kelekatan	168
D.	Defleksi, Kekasaran, dan Daya Dukung Perkerasan	173
 BAB X PERAWATAN DAN REHABILITASI JALAN.....		
		179
A.	Jenis-jenis Kerusakan Jalan	179
B.	Strategi Pemeliharaan	186
C.	Teknologi <i>Overlay</i> dan Daur Ulang Perkerasan.....	192
D.	Sistem Manajemen Pemeliharaan Jalan	201

BAB XI KESIMPULAN	207
DAFTAR PUSTAKA	209
GLOSARIUM	218
INDEKS	220
BIOGRAFI PENULIS.....	223
SINOPSIS	225



BAB I

PENDAHULUAN KONSTRUKSI

PERKERASAN JALAN

Perkerasan jalan merupakan salah satu komponen utama dalam sistem infrastruktur transportasi yang berfungsi untuk mendistribusikan beban kendaraan ke tanah dasar serta menyediakan permukaan yang nyaman, aman, dan tahan lama bagi pengguna jalan. Dalam konteks pembangunan nasional, kualitas perkerasan jalan menjadi indikator penting dalam menunjang pertumbuhan ekonomi, distribusi barang dan jasa, serta mobilitas penduduk. Oleh karena itu, pemahaman menyeluruh tentang konsep, jenis, serta prinsip dasar konstruksi perkerasan sangat diperlukan oleh para insinyur sipil, kontraktor, akademisi, dan pengambil kebijakan di bidang infrastruktur.

A. Fungsi Jalan dalam Sistem Transportasi

Jalan adalah salah satu elemen terpenting dalam sistem transportasi darat. Fungsinya sangat vital dalam mendukung mobilitas manusia dan barang, serta berperan langsung dalam pembangunan ekonomi, sosial, dan pemerataan wilayah. Dalam konteks pembangunan nasional, keberadaan jalan tidak hanya dipandang sebagai sarana teknis, melainkan juga sebagai katalisator pertumbuhan wilayah. Kualitas jaringan jalan sangat menentukan efektivitas sistem transportasi yang terintegrasi, efisien, dan berkelanjutan. Menurut Kementerian Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat (PUPR, 2021), jalan merupakan infrastruktur utama yang menghubungkan wilayah satu dengan wilayah lainnya, mempercepat distribusi logistik, serta mempengaruhi biaya operasional transportasi dan aksesibilitas antarwilayah. Dengan kata lain, jalan adalah urat nadi pembangunan nasional dan kunci integrasi kawasan.

Secara yuridis, definisi jalan mengacu pada Undang-Undang Republik Indonesia No. 38 Tahun 2004 tentang Jalan yang menyatakan bahwa jalan adalah prasarana transportasi darat yang meliputi segala bagian jalan, termasuk bangunan pelengkap dan perlengkapannya yang diperuntukkan bagi lalu lintas umum, yang berada di permukaan tanah, di atas permukaan tanah, di bawah permukaan tanah dan/atau air, serta di atas permukaan air, kecuali jalan rel dan jalan kabel (UU No. 38 Tahun 2004). Sementara itu, transportasi adalah sistem mobilitas yang bertujuan memindahkan manusia dan barang dari satu tempat ke tempat lain secara efisien. Jalan sebagai bagian dari moda transportasi darat memiliki keunggulan dalam hal fleksibilitas, kemudahan akses, dan cakupan wilayah yang luas.

1. Fungsi Ekonomi

Fungsi ekonomi jalan memiliki peranan yang sangat krusial dalam menunjang pertumbuhan ekonomi suatu negara, terutama melalui peningkatan efisiensi distribusi barang dan jasa. Jalan yang memadai dan terintegrasi dengan baik ke pusat-pusat produksi, distribusi, dan konsumsi berkontribusi signifikan dalam menurunkan biaya logistik. Di Indonesia, tingginya biaya logistik yang mencapai 23,5% dari Produk Domestik Bruto (PDB) menurut Bappenas (2020) menjadi salah satu tantangan utama dalam daya saing ekonomi nasional. Penyebab utama dari tingginya biaya tersebut adalah kondisi jalan yang buruk dan keterhubungan jaringan yang belum optimal. Dalam konteks ini, pembangunan dan peningkatan kualitas jalan merupakan solusi strategis untuk menekan biaya distribusi dan meningkatkan efisiensi transportasi.

Investasi infrastruktur jalan juga memiliki dampak langsung terhadap pertumbuhan ekonomi. Berdasarkan studi yang dilakukan oleh World Bank (2018), setiap peningkatan 1% dalam kualitas jalan nasional dapat mendorong pertumbuhan ekonomi sebesar 0,5%. Hal ini terjadi melalui berbagai mekanisme, seperti peningkatan efisiensi logistik, pengurangan waktu tempuh, serta pengurangan kerugian akibat kerusakan barang dalam pengangkutan. Jalan yang berkualitas memfasilitasi mobilitas ekonomi yang lebih cepat dan andal, sehingga sektor-sektor seperti industri manufaktur, pertanian, dan perdagangan dapat beroperasi secara lebih produktif.

2. Fungsi Sosial

Fungsi sosial jalan sangat fundamental dalam mendukung kehidupan masyarakat secara luas. Jalan tidak hanya berperan sebagai infrastruktur fisik untuk pergerakan kendaraan, tetapi juga sebagai penghubung antarindividu dan kelompok masyarakat untuk menjalankan aktivitas sosial, budaya, serta pendidikan. Akses jalan yang memadai memungkinkan mobilitas masyarakat menjadi lebih lancar, sehingga masyarakat dapat lebih mudah mengakses layanan dasar seperti fasilitas kesehatan, sekolah, tempat ibadah, dan pusat administrasi. Dalam konteks layanan publik, keberadaan jalan yang layak sangat menentukan keterjangkauan terhadap pendidikan dan pelayanan kesehatan, terutama bagi masyarakat yang tinggal di daerah terpencil atau perdesaan.

Jalan juga memiliki peran penting dalam konteks tanggap darurat. Dalam situasi bencana alam atau kondisi darurat medis, ketersediaan jalan yang baik dapat mempercepat proses evakuasi maupun pengiriman bantuan. Keterhubungan jalan berperan krusial dalam mendukung sistem tanggap darurat yang efisien, termasuk akses ambulans dan kendaraan penyelamat ke lokasi terdampak. Tanpa akses jalan yang memadai, proses penyelamatan dan pengiriman logistik menjadi terhambat, yang pada akhirnya berpotensi meningkatkan dampak buruk dari suatu bencana.

3. Fungsi Politik dan Pertahanan

Fungsi politik dan pertahanan dari infrastruktur jalan tidak dapat dipisahkan dari konteks geopolitik dan kedaulatan nasional. Jalan berperan strategis sebagai simbol dan sarana penjaga keutuhan wilayah suatu negara, terutama di negara kepulauan seperti Indonesia yang memiliki wilayah luas dan beragam. Dalam konteks ini, pembangunan jalan di wilayah 3T (tertinggal, terdepan, dan terluar) menjadi sangat penting untuk memastikan bahwa seluruh bagian negara dapat terhubung dengan pusat pemerintahan dan sistem nasional lainnya. Konektivitas ini bukan hanya bertujuan untuk pelayanan publik, tetapi juga menjadi representasi kehadiran negara dalam menjaga keutuhan teritorialnya.

Pemerintah Indonesia, melalui Program Nawacita, telah menempatkan pembangunan jalan di wilayah perbatasan sebagai prioritas nasional. Pendekatan ini merupakan bagian dari pembangunan yang merata dan berkeadilan, di mana wilayah yang sebelumnya terisolasi kini mendapat akses yang lebih baik ke pusat-pusat ekonomi

dan pemerintahan. Jalan di wilayah perbatasan, seperti di Kalimantan, Papua, dan Nusa Tenggara, dibangun dengan tujuan memperkuat peran negara di kawasan tersebut sekaligus mengurangi ketimpangan antarwilayah. Kehadiran jalan yang baik di wilayah ini juga menjadi bentuk nyata komitmen negara dalam melindungi kedaulatan wilayahnya dari potensi ancaman eksternal.

4. Fungsi Lingkungan dan Tata Ruang

Fungsi lingkungan dan tata ruang dari infrastruktur jalan menjadi semakin penting dalam era pembangunan berkelanjutan. Jalan tidak hanya berperan sebagai penghubung fisik antarwilayah, tetapi juga memiliki dampak yang signifikan terhadap kualitas lingkungan dan pengelolaan ruang. Selama ini, jalan sering kali diasosiasikan dengan degradasi lingkungan, seperti deforestasi, peningkatan polusi udara, dan fragmentasi habitat. Namun, dengan pendekatan perencanaan yang tepat, pembangunan jalan dapat diarahkan untuk mendukung tata ruang yang lebih efisien dan memperkuat fungsi lingkungan secara terpadu.

Konsep green infrastructure menjadi solusi dalam mengintegrasikan pembangunan jalan dengan pelestarian ekosistem. Jalan yang dibangun dengan mempertimbangkan keberadaan ekosistem lokal dapat dilengkapi dengan berbagai elemen ramah lingkungan, seperti *eco-bridge* (jembatan satwa) yang memungkinkan migrasi fauna tanpa mengganggu aktivitas kendaraan. Selain itu, penerapan sistem drainase berkelanjutan atau *Sustainable Urban Drainage Systems* (SUDS) membantu mengurangi limpasan air hujan dan mencegah banjir, sekaligus memperbaiki kualitas air yang masuk ke badan air alami di sekitarnya. Dengan demikian, jalan bukan hanya infrastruktur transportasi, tetapi juga instrumen penting dalam pengelolaan lingkungan.

B. Jenis-jenis Perkerasan Jalan

Perkerasan jalan merupakan elemen kunci dalam infrastruktur transportasi darat, karena bertugas menopang beban lalu lintas dan menyalurkannya ke tanah dasar secara efisien. Keandalan struktur perkerasan memengaruhi kualitas layanan jalan, kenyamanan berkendara, efisiensi bahan bakar, dan biaya pemeliharaan jangka panjang. Pemilihan jenis perkerasan jalan sangat bergantung pada

berbagai faktor, seperti kondisi lalu lintas, jenis tanah dasar, iklim, biaya konstruksi dan pemeliharaan, serta umur rencana jalan tersebut. Secara umum, perkerasan jalan diklasifikasikan menjadi tiga jenis utama: perkerasan lentur (*flexible pavement*), perkerasan kaku (*rigid pavement*), dan perkerasan komposit (*Composite Pavement*). Ketiganya memiliki karakteristik, struktur, material, dan metode konstruksi yang berbeda-beda (Huang, 2004).

1. Perkerasan Lentur (*Flexible Pavement*)

Perkerasan lentur adalah jenis perkerasan yang terdiri dari beberapa lapisan material yang bersifat fleksibel, yang mampu mengalami deformasi seiring dengan tanah dasar saat menerima beban lalu lintas. Umumnya, perkerasan ini menggunakan aspal sebagai bahan pengikat utama (Yoder & Witczak, 1991). Beban kendaraan disalurkan secara bertahap dari lapisan atas ke lapisan bawah dengan penurunan tegangan secara progresif. Karakteristik perkerasan lentur:

- a. Memiliki modulus elastisitas yang rendah.
- b. Lapisan-lapisannya bekerja secara bersama-sama dalam mendistribusikan beban.
- c. Rentan terhadap kerusakan karena kelembaban dan temperatur tinggi.
- d. Umur rencana biasanya lebih pendek dibanding perkerasan kaku.

Menurut Direktorat Jenderal Bina Marga (2020), struktur perkerasan lentur terdiri dari:

- a. Lapisan aus (*Surface Course*): biasanya menggunakan campuran aspal panas (hot mix asphalt).
- b. Lapisan pondasi atas (*Base Course*): material agregat bergradasi, kadang stabilisasi semen atau aspal.
- c. Lapisan pondasi bawah (*subbase*): agregat kasar atau tanah yang diperkuat.
- d. Tanah dasar (*Subgrade*): tanah asli yang telah dipadatkan.

Kelebihan:

- a. Biaya awal lebih rendah.
- b. Waktu konstruksi relatif cepat.
- c. Fleksibel terhadap deformasi tanah dasar yang tidak seragam.

Kekurangan:

- a. Umur layan lebih pendek jika tidak dirawat.
- b. Lebih sering memerlukan pemeliharaan rutin dan periodik.

- c. Rentan terhadap pengaruh temperatur dan air.

Di Indonesia, perkerasan lentur menjadi dominan dalam pembangunan jalan karena keunggulannya dalam hal biaya, waktu pelaksanaan, dan kemudahan perawatan. Penggunaan aspal sebagai material utama lapisan permukaan sangat cocok dengan kondisi iklim tropis Indonesia yang bersifat basah dan panas bergantian. Di samping itu, ketersediaan material lokal seperti agregat dan aspal alam juga mendukung efisiensi biaya konstruksi perkerasan lentur dibandingkan dengan perkerasan kaku.

2. Perkerasan Kaku (*Rigid Pavement*)

Perkerasan kaku adalah jenis perkerasan yang menggunakan beton semen portland (*Portland Cement Concrete*, PCC) sebagai lapisan utamanya. Berbeda dengan perkerasan lentur, perkerasan kaku mampu mendistribusikan beban secara luas karena memiliki modulus elastisitas yang tinggi (Delatte, 2017). Tegangan beban tidak menurun secara bertahap, melainkan langsung didistribusikan ke permukaan tanah dasar oleh pelat beton. Karakteristik perkerasan kaku:

- a. Tahan terhadap deformasi permanen.
- b. Lebih tahan terhadap kerusakan karena air dan suhu ekstrem.
- c. Umur rencana lebih panjang (20–40 tahun) dibanding perkerasan lentur.

Struktur umum perkerasan kaku terdiri dari:

- a. Slab beton (*concrete slab*): lapisan utama yang menahan beban.
- b. Lapisan pondasi bawah (*subbase*): berfungsi sebagai alas dan membantu drainase.
- c. Tanah dasar (*Subgrade*): harus dikondisikan dan dipadatkan dengan baik.

Jenis perkerasan kaku diklasifikasikan lebih lanjut menjadi:

- a. *Jointed Plain Concrete Pavement* (JPCP).
- b. *Jointed Reinforced Concrete Pavement* (JRCP).
- c. *Continuously Reinforced Concrete Pavement* (CRCP).

Kelebihan:

- a. Umur pelayanan lebih panjang.
- b. Biaya pemeliharaan lebih rendah dalam jangka panjang.
- c. Tahan terhadap beban lalu lintas berat dan kondisi lingkungan ekstrem.

Kekurangan:

- a. Biaya awal tinggi.
- b. Waktu pengerasan lama.
- c. Sulit diperbaiki jika rusak.

Di Indonesia, perkerasan kaku semakin banyak digunakan, khususnya dalam pembangunan jalan bebas hambatan seperti proyek Tol Trans Jawa dan Tol Trans Sumatera. Menurut laporan Badan Pengatur Jalan Tol (BPJT, 2022), sejumlah ruas tol strategis seperti ruas Tol Jakarta-Cikampek Elevated II dan beberapa segmen Tol Sumatera menggunakan perkerasan kaku karena faktor kekuatan, umur rencana yang panjang, serta biaya pemeliharaan jangka panjang yang relatif lebih rendah. Selain itu, kondisi lalu lintas yang padat dan dominasi kendaraan berat pada ruas-ruas tol tersebut menjadikan perkerasan kaku sebagai pilihan yang logis dari sisi teknis dan ekonomi.

3. Perkerasan Komposit (*Composite Pavement*)

Perkerasan komposit adalah kombinasi antara perkerasan kaku dan lentur. Umumnya, digunakan pelat beton sebagai lapisan bawah, kemudian dilapisi dengan aspal sebagai lapisan atas. Tujuan utama dari sistem ini adalah memanfaatkan keunggulan dari kedua jenis perkerasan: kekuatan beton dan fleksibilitas aspal. Karakteristik:

- a. Memberikan kenyamanan berkendara setara perkerasan lentur.
- b. Tahan terhadap beban tinggi karena fondasi beton.
- c. Pelapis aspal membantu mencegah keretakan dini pada beton.

Struktur umum perkerasan komposit terdiri dari:

- a. Lapisan aspal (HMA): memberikan permukaan halus dan fleksibel.
- b. Pelat beton (PCC slab): memberikan kekuatan struktural utama.
- c. *Subbase* dan *Subgrade*: seperti perkerasan lainnya.

Kelebihan:

- a. Kombinasi kekuatan dan kenyamanan.
- b. Dapat memperpanjang umur pelayanan perkerasan kaku yang sudah ada.
- c. Biaya pemeliharaan lebih rendah jika dibanding perkerasan lentur murni.

Kekurangan:

- a. Biaya konstruksi relatif tinggi.
- b. Kompleksitas dalam desain dan pelaksanaan konstruksi.

Di Indonesia, penerapan perkerasan komposit masih tergolong terbatas dan umumnya digunakan dalam proyek rehabilitasi jalan. Salah satu contoh aplikasi yang umum adalah *overlay* aspal di atas pelat beton lama yang mulai menunjukkan keretakan permukaan. Sistem ini sangat efektif diterapkan pada jalan-jalan dengan tingkat lalu lintas tinggi dan kondisi tanah dasar yang lemah, karena struktur beton dapat menahan beban utama, sementara lapisan aspal berfungsi menyerap tegangan permukaan dan memperpanjang umur layanan jalan.

4. Perbandingan Jenis Perkerasan

Aspek	Perkerasan Lentur	Perkerasan Kaku	Perkerasan Komposit
Umur Rencana	10–20 tahun	20–40 tahun	25–35 tahun
Biaya Awal	Rendah	Tinggi	Tinggi
Biaya Pemeliharaan	Tinggi	Rendah	Sedang
Waktu Konstruksi	Cepat	Lama	Sedang
Kenyamanan Berkendara	Tinggi	Sedang	Tinggi
Fleksibilitas Terhadap Tanah	Tinggi	Rendah	Sedang

C. Komponen Struktur Perkerasan Jalan

Perkerasan jalan merupakan elemen struktural yang sangat penting dalam sistem transportasi modern. Fungsi utamanya adalah untuk menyalurkan beban lalu lintas secara efisien ke tanah dasar tanpa menyebabkan deformasi atau kerusakan yang berarti pada lapisan-lapisan di bawahnya. Struktur perkerasan yang baik harus mampu menahan beban dinamis kendaraan, beban lingkungan, dan beban akibat perubahan iklim serta kelembaban. Oleh karena itu, pemahaman yang menyeluruh tentang komponen struktur perkerasan jalan menjadi sangat penting dalam perencanaan, pelaksanaan, dan pemeliharaan jalan (Huang, 2004).

Struktur perkerasan jalan terdiri dari beberapa lapisan dengan fungsi dan karakteristik yang berbeda, yaitu: lapisan aus (*Surface Course*), lapisan pondasi atas (*Base Course*), lapisan pondasi bawah

(*SubBase Course*), dan tanah dasar (*Subgrade*). Masing-masing komponen ini dirancang untuk bekerja secara sinergis dalam mendistribusikan beban dan menjaga keandalan struktur jalan secara keseluruhan (Direktorat Jenderal Bina Marga, 2020).

1. Tanah Dasar (*Subgrade*)

Tanah dasar (*Subgrade*) adalah lapisan tanah asli atau tanah yang telah dipadatkan di bawah lapisan-lapisan perkerasan. Tanah dasar berfungsi sebagai fondasi dari struktur perkerasan dan memiliki pengaruh besar terhadap daya dukung dan stabilitas jalan. Fungsi utama tanah dasar adalah:

- a. Menahan beban vertikal yang ditransmisikan dari lapisan atas.
- b. Menyediakan alas yang stabil dan seragam untuk lapisan perkerasan.
- c. Menahan perubahan volume akibat siklus basah/kering atau beku/cair.

Stabilitas tanah dasar sangat memengaruhi kinerja dan umur jalan secara keseluruhan. Oleh karena itu, tanah dasar yang memiliki daya dukung rendah harus diperbaiki terlebih dahulu agar tidak menimbulkan deformasi atau penurunan permukaan jalan secara dini. Evaluasi karakteristik tanah dasar seperti kepadatan, kelembapan, dan nilai CBR (*California Bearing Ratio*) menjadi tahap awal dalam proses perencanaan jalan yang baik.

Apabila hasil pengujian menunjukkan bahwa tanah dasar tidak cukup stabil, maka diperlukan tindakan stabilisasi. Salah satu metode yang umum digunakan adalah stabilisasi kimiawi menggunakan bahan seperti semen, kapur, atau bahan aditif khusus. Semen dan kapur bekerja dengan mereaksikan senyawa kimia dalam tanah sehingga membentuk struktur yang lebih padat dan kuat. Selain itu, teknologi stabilisasi mekanik seperti pemadatan ulang dan pencampuran tanah asli dengan agregat kasar juga sering diterapkan untuk memperbaiki kualitas tanah dasar secara fisik.

2. Lapisan Pondasi Bawah (*SubBase Course*)

Lapisan pondasi bawah terletak di atas tanah dasar dan di bawah lapisan pondasi atas. Fungsi utamanya adalah:

- a. Menyebarkan beban dari lapisan atas ke *Subgrade*.

- b. Menyediakan fungsi drainase dan perlindungan terhadap intrusi air ke *Subgrade*.
- c. Meningkatkan stabilitas dan kekuatan keseluruhan struktur perkerasan.

Material yang digunakan dalam subbase umumnya berupa agregat granular tanpa pengikat (misalnya batu pecah atau kerikil), kadang ditambahkan stabilisasi semen atau aspal. Kriteria pemilihan material mencakup gradasi yang seragam, kekuatan tekan tinggi, dan permeabilitas yang memadai (Huang, 2004). Spesifikasi teknis Bina Marga mengatur persyaratan gradasi, kadar air, dan pemadatan minimal 95% Modified Proctor. Drainase yang baik dari subbase sangat penting untuk mencegah akumulasi air yang dapat merusak struktur jalan.

3. Lapisan Pondasi Atas (*Base Course*)

Lapisan pondasi atas terletak langsung di bawah lapisan aus. Fungsinya antara lain:

- a. Mendistribusikan beban kendaraan ke lapisan *subbase* dan *Subgrade*.
- b. Menyediakan permukaan yang kokoh untuk konstruksi lapisan atas.
- c. Menambah ketahanan terhadap deformasi permanen (*rutting*)

Material *Base Course* dapat berupa agregat granular padat atau bahan yang distabilisasi. Di Indonesia, jenis material yang sering digunakan meliputi:

- a. Agregat kelas A (campuran batu pecah dengan gradasi tertentu).
- b. *Lean concrete base* atau *stabilized base* (base yang dicampur dengan semen atau aspal untuk menambah kekuatan).

Lapisan base harus memiliki kekuatan tekan tinggi, gradasi yang baik, dan pemadatan minimal 98% Modified Proctor. Untuk jalan dengan lalu lintas berat, stabilisasi material base dapat sangat meningkatkan umur rencana jalan (ACI, 2019).

4. Lapisan Aus (*Surface Course*)

Lapisan aus adalah lapisan paling atas dari struktur perkerasan yang langsung berinteraksi dengan kendaraan dan cuaca. Fungsi utamanya meliputi:

- a. Memberikan permukaan yang halus dan nyaman bagi pengguna jalan.

- b. Melindungi lapisan-lapisan di bawahnya dari air dan beban langsung.
- c. Menyediakan gesekan yang memadai untuk keselamatan berkendara.

Material yang digunakan bervariasi tergantung jenis perkerasan:

- a. Untuk perkerasan lentur: campuran aspal panas (*Hot Mix Asphalt/HMA*).
- b. Untuk perkerasan kaku: beton semen portland dengan finishing tertentu.
- c. Untuk perkerasan komposit: kombinasi keduanya, aspal di atas beton.

Penggunaan material seperti Modified Bitumen atau *Warm Mix Asphalt* (WMA) telah meningkat dalam satu dekade terakhir untuk meningkatkan performa dan keberlanjutan lingkungan. Ketebalan lapisan aus bervariasi antara 4–10 cm tergantung jenis lalu lintas dan iklim. Di Indonesia, standar ketebalan dan material merujuk pada Spesifikasi Umum Bina Marga edisi 2018 revisi 2.

5. Lapisan Tambahan (Lapisan Antara)

Lapisan tambahan atau interlayer merupakan elemen penting dalam sistem perkerasan modern, khususnya pada struktur perkerasan komposit dan *overlay* aspal di atas beton. Keberadaan interlayer bertujuan untuk mengoptimalkan kinerja perkerasan dengan memberikan fungsi tambahan yang tidak dimiliki oleh lapisan perkerasan konvensional. Salah satu fungsi utamanya adalah mencegah terjadinya refleksi retak, yaitu perambatan retak dari lapisan bawah (biasanya beton lama) ke lapisan atas (aspal *overlay*). Refleksi retak dapat menurunkan umur layanan perkerasan dan memicu kerusakan dini jika tidak dicegah secara efektif (Huang, 2004).

Interlayer juga berfungsi sebagai elemen yang meningkatkan fleksibilitas struktur perkerasan dan menambah kapasitas drainase horizontal. Drainase ini sangat penting untuk menghindari penumpukan air dalam struktur jalan yang dapat menyebabkan pengelupasan, penurunan kekuatan, atau pengembangan tekanan pori negatif. Di sisi lain, lapisan antara juga meningkatkan ikatan antara dua lapisan berbeda yang memiliki sifat fisik dan mekanik tidak seragam, seperti antara beton lama dan aspal baru. Daya ikat yang baik akan mencegah terjadinya delaminasi dan pergeseran lapisan saat menerima beban lalu lintas berat.

6. Drainase Perkerasan

Sistem drainase merupakan elemen krusial dalam struktur perkerasan jalan, namun kerap kali luput dari perhatian dalam proses perencanaan maupun pelaksanaan. Padahal, keberadaan dan kinerja drainase sangat menentukan umur layanan perkerasan. Air yang tidak terkelola dengan baik akan meresap ke dalam lapisan jalan, menyebabkan pelemahan pada tanah dasar dan lapisan granular, serta memicu deformasi permanen, retak, bahkan kerusakan struktural secara dini.

Sistem drainase dalam perkerasan jalan terbagi menjadi dua bagian utama: drainase permukaan dan drainase bawah permukaan. Drainase permukaan bertugas mengalirkan air hujan dari permukaan jalan ke sisi luar bahu atau saluran pinggir. Komponen ini meliputi kemiringan melintang jalan (*cross slope*), saluran pinggir (*side ditch*), dan lubang resapan. Drainase bawah permukaan berfungsi untuk mengalirkan air yang masuk ke lapisan bawah perkerasan melalui pori-pori atau rekahan. Sistem ini mencakup sub-drain, geodrain, dan saluran berlapis batu pecah atau pipa berlubang, yang berfungsi menjaga kelembaban tanah dasar tetap rendah dan mencegah tekanan pori yang tinggi. Tanpa sistem drainase yang baik, air akan terperangkap di dalam struktur perkerasan, menyebabkan erosi partikel halus, kehilangan daya dukung, dan penurunan stabilitas struktur secara keseluruhan.

7. Kinerja dan Interaksi Antar Komponen

Setiap lapisan dalam struktur perkerasan jalan berperan sebagai bagian dari sistem yang saling berinteraksi dan mendukung fungsi keseluruhan. Kinerja jalan tidak hanya bergantung pada kekuatan atau ketebalan satu lapisan saja, melainkan pada sinergi antar lapisan mulai dari tanah dasar (*Subgrade*), lapisan pondasi, hingga lapisan permukaan. Setiap lapisan harus memiliki kualitas material dan dimensi yang tepat agar beban dari kendaraan dapat didistribusikan secara efektif dan tidak menyebabkan kerusakan dini pada struktur perkerasan (Yoder & Witczak, 1991).

Prinsip *load-spreading* atau penyebaran beban menjadi dasar penting dalam memahami interaksi antar lapisan perkerasan. Lapisan atas jalan menyalurkan beban kendaraan ke lapisan-lapisan di bawahnya dengan distribusi tekanan yang semakin melebar dan berkurang

intensitasnya. Jika salah satu lapisan mengalami kegagalan, seperti *Subgrade* yang tergenang air atau lapisan pondasi yang tidak stabil, maka kemampuan sistem untuk menahan beban akan menurun drastis. Hal ini bisa menyebabkan deformasi permanen, retak, atau kerusakan struktural lain yang berakibat pada penurunan umur jalan.



BAB II

STANDAR DAN SPESIFIKASI TEKNIS PERKERASAN JALAN

Standar dan spesifikasi teknis merupakan dasar penting dalam pelaksanaan konstruksi perkerasan jalan. Tujuannya adalah untuk memastikan bahwa setiap tahapan pembangunan, mulai dari pemilihan material hingga proses konstruksi di lapangan, dilakukan sesuai dengan ketentuan mutu dan keamanan yang ditetapkan. Di Indonesia, pedoman teknis seperti Standar Nasional Indonesia (SNI) dan Spesifikasi Umum Bina Marga menjadi acuan utama dalam menentukan jenis material, metode pelaksanaan, serta kriteria pengujian mutu yang harus dipenuhi. Dengan adanya standar yang seragam, kualitas jalan yang dibangun dapat dijaga agar memiliki daya tahan terhadap beban lalu lintas dan perubahan cuaca.

Pada pengaplikasiannya, standar teknis ini tidak hanya mengatur aspek teknis material seperti karakteristik agregat, aspal, dan semen, tetapi juga aspek metode kerja dan spesifikasi kinerja jalan. Misalnya, spesifikasi teknis untuk lapisan pondasi dan permukaan jalan mengatur tentang ukuran butiran, kekuatan tekan, kepadatan minimum, serta metode pengujian laboratorium dan lapangan (SNI 03-3438-1994). Spesifikasi tersebut juga diperbaharui secara berkala mengikuti perkembangan teknologi konstruksi dan kebutuhan lalu lintas jalan yang semakin kompleks.

A. Standar Nasional

Pada konstruksi infrastruktur jalan, penerapan standar nasional sangatlah penting untuk menjamin kualitas, keselamatan, serta umur panjang dari struktur jalan yang dibangun. Standar nasional bertujuan untuk menyeragamkan spesifikasi teknis, metode pelaksanaan, dan kriteria mutu dalam pembangunan jalan, sehingga infrastruktur yang

dihasilkan dapat berfungsi optimal sesuai dengan peruntukannya. Di Indonesia, lembaga utama yang bertanggung jawab terhadap penyusunan dan penerapan standar teknis perkerasan jalan adalah Kementerian Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat (PUPR) melalui Direktorat Jenderal Bina Marga, serta Badan Standardisasi Nasional (BSN) melalui penerbitan Standar Nasional Indonesia (SNI). Standar-standar ini memberikan kerangka kerja yang sistematis dan baku mulai dari perencanaan, desain teknis, pemilihan material, pelaksanaan konstruksi, hingga pemeliharaan perkerasan jalan. Standar juga berfungsi sebagai alat pengawasan dan pengendalian mutu bagi para pelaku konstruksi jalan, baik dari sektor pemerintah maupun swasta (Direktorat Jenderal Bina Marga, 2020).

1. Standar Nasional Indonesia (SNI)

Standar Nasional Indonesia (SNI) adalah dokumen standar yang ditetapkan oleh BSN dan bersifat mengikat dalam konteks pembangunan infrastruktur yang dibiayai negara. Tujuan penerapan SNI dalam bidang konstruksi jalan adalah untuk:

- a. Menjamin kesesuaian mutu konstruksi.
- b. Meningkatkan efisiensi dan efektivitas penggunaan material.
- c. Meningkatkan keselamatan pengguna jalan dan perlindungan terhadap lingkungan.

Setiap SNI biasanya mengatur aspek tertentu, seperti:

- a. Pengujian laboratorium dan lapangan.
- b. Ketebalan dan struktur lapisan perkerasan.
- c. Kriteria lalu lintas dan beban rencana (traffic loading).
- d. Prosedur pengambilan dan pengolahan sampel material.

SNI dirancang untuk memastikan kualitas, keselamatan, dan ketahanan bangunan serta infrastruktur yang dibangun di Indonesia sesuai dengan kebutuhan lokal dan kondisi lingkungan setempat. Dengan adanya SNI, setiap tahapan pelaksanaan, mulai dari pemilihan bahan, proses konstruksi, hingga pengujian mutu, dapat dilakukan secara konsisten dan terukur guna mencapai hasil yang optimal.

Indonesia juga berupaya menyelaraskan SNI dengan berbagai standar internasional seperti ASTM (*American Society for Testing and Materials*), AASHTO (*American Association of State Highway and Transportation Officials*), dan ISO (*International Organization for Standardization*). Harmonisasi ini penting agar standar yang diterapkan

di Indonesia tidak hanya memenuhi kebutuhan nasional, tetapi juga mampu bersaing di tingkat global. Dengan demikian, produk dan hasil pembangunan infrastruktur yang mengacu pada SNI dapat diterima secara luas dan memenuhi persyaratan teknis internasional, sehingga membuka peluang kerja sama dan investasi dari luar negeri.

2. Spesifikasi Umum Bina Marga (PUBM)

Selain SNI, standar teknis utama dalam konstruksi jalan nasional dan provinsi di Indonesia mengacu pada dokumen Spesifikasi Umum (Spesifikasi Teknis) Bina Marga, yang diterbitkan oleh Direktorat Jenderal Bina Marga, Kementerian PUPR. Dokumen ini diperbarui secara berkala mengikuti perkembangan teknologi konstruksi dan kebijakan pemerintah. Edisi terbaru yang digunakan secara luas adalah:

a. Spesifikasi Umum 2018

Spesifikasi Umum Bina Marga memuat ketentuan teknis yang sangat rinci mencakup:

- a. Jenis dan mutu bahan yang digunakan (aspal, agregat, semen, dll.).
- b. Persyaratan teknis pelaksanaan konstruksi (pemadatan, pencampuran, penyebaran material).
- c. Ketentuan pengujian mutu dan pengawasan teknis.
- d. Toleransi deviasi mutu dan penalti mutu.

Dokumen ini sangat penting sebagai acuan bagi para pelaku proyek, mulai dari kontraktor hingga konsultan, untuk memastikan bahwa setiap tahap pekerjaan memenuhi persyaratan teknis yang telah ditetapkan. PUBM dirancang untuk menjamin kualitas konstruksi jalan agar tahan lama dan aman digunakan oleh masyarakat, serta dapat menyesuaikan dengan kondisi iklim dan lingkungan di Indonesia.

Salah satu aspek penting dalam PUBM adalah penerapan sistem *Quality Assurance* (QA) dan *Quality Control* (QC). Sistem ini mewajibkan adanya pengujian laboratorium secara berkala pada bahan dan material yang digunakan, serta pada hasil pekerjaan di lapangan. QA/QC berfungsi sebagai alat pengawasan untuk memastikan bahwa proses konstruksi berjalan sesuai dengan spesifikasi teknis, sehingga kesalahan atau penyimpangan dapat segera terdeteksi dan diperbaiki. Dengan adanya sistem ini, akuntabilitas pelaksanaan proyek menjadi lebih kuat, karena setiap pihak yang terlibat bertanggung jawab terhadap mutu pekerjaan yang dihasilkan.

3. Standar Tambahan dan Spesifikasi Khusus

a. Petunjuk Teknis (Juknis) dan Manual Teknis

Selain dokumen resmi seperti SNI dan Spesifikasi Umum, tersedia pula berbagai Petunjuk Teknis (Juknis) dan Manual Teknis, antara lain:

- 1) Manual Pemeliharaan Jalan Rutin.
- 2) Manual Desain Geometrik Jalan.
- 3) Panduan Pemanfaatan Material Lokal untuk Base/Subbase.

Dokumen ini memberikan detail tambahan untuk proyek jalan dengan kondisi khusus, seperti jalan desa, jalan kawasan tambang, atau jalan strategis nasional.

b. Peraturan Menteri PUPR

Beberapa Peraturan Menteri (Permen), misalnya:

- 1) Permen PUPR No. 28 Tahun 2016.
- 2) Permen PUPR No. 27 Tahun.

4. Kesesuaian Standar terhadap Tantangan Lokal

Penerapan standar nasional dalam pembangunan jalan di Indonesia harus disesuaikan dengan kondisi geografis dan lingkungan yang sangat beragam. Negara kepulauan ini memiliki tantangan lokal yang unik, mulai dari tanah ekspansif dan gambut di wilayah Sumatera dan Kalimantan hingga daerah rawan longsor di Sulawesi dan Papua. Kondisi ini memerlukan pendekatan teknis khusus agar konstruksi jalan dapat bertahan lama dan berfungsi dengan optimal, sekaligus mengurangi risiko kerusakan akibat faktor alam yang khas di setiap daerah.

Tanah ekspansif dan gambut, yang memiliki sifat sangat lembek dan rentan perubahan volume, menuntut metode stabilisasi tanah yang tepat agar pondasi jalan kuat dan tidak mengalami penurunan atau retak. Standar nasional seperti SNI 03-3438-1994 tentang stabilisasi tanah memberikan pedoman teknis untuk mengatasi permasalahan ini dengan penggunaan bahan stabilisasi kimia seperti semen dan kapur. Standar ini juga mengatur prosedur pelaksanaan dan pengujian agar hasil stabilisasi memenuhi kriteria kekuatan dan ketahanan yang diharapkan.

Daerah rawan longsor seperti di Sulawesi dan Papua membutuhkan perencanaan drainase yang cermat dan penggunaan konstruksi penahan tanah untuk mengurangi risiko kegagalan lereng. Curah hujan yang tinggi di banyak wilayah Indonesia juga memperberat

tantangan drainase dan daya dukung tanah. Oleh karena itu, standar teknis dan modul pelatihan dari Balai Teknik Jalan Wilayah menekankan pentingnya sistem drainase permukaan dan bawah permukaan yang efektif untuk mengalirkan air secara cepat dan mencegah akumulasi air yang dapat melemahkan struktur jalan.

B. Spesifikasi Umum dan Teknis Material

Kualitas dan ketahanan suatu perkerasan jalan sangat ditentukan oleh spesifikasi umum dan teknis material yang digunakan dalam konstruksi. Dalam pembangunan infrastruktur jalan, pemilihan dan penggunaan material yang sesuai dengan standar teknis merupakan aspek fundamental yang menjamin umur layan, kestabilan struktur, serta kenyamanan dan keselamatan pengguna jalan. Kementerian Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat (PUPR) melalui Direktorat Jenderal Bina Marga secara berkala menerbitkan dokumen spesifikasi umum dan teknis sebagai acuan utama bagi pelaksanaan pekerjaan jalan. Dokumen ini menjabarkan karakteristik material yang boleh digunakan, metode pengujian, dan persyaratan teknis lainnya (Direktorat Jenderal Bina Marga, 2020).

Spesifikasi umum mengatur persyaratan dasar material dan metode kerja, sedangkan spesifikasi teknis mendetailkan karakteristik dan mutu material yang digunakan. Dalam konteks perkerasan jalan, keduanya mencakup:

1. Bahan perkerasan lentur: agregat, aspal, filler.
2. Bahan perkerasan kaku: semen, air, agregat halus dan kasar.
3. Material *Subgrade* dan subbase: tanah, batu pecah, agregat campuran, serta stabilisasi kimia.

Dokumen utama yang menjadi rujukan adalah Spesifikasi Umum 2018 Revisi 2 yang diterbitkan oleh Direktorat Jenderal Bina Marga dan dilengkapi oleh SNI yang relevan.

1. Material untuk Perkerasan Lentur

a. Agregat

Agregat merupakan komponen utama dalam perkerasan lentur dan dibagi menjadi agregat kasar (kerikil/batu pecah) dan agregat halus (pasir). Spesifikasi teknis mensyaratkan:

- 1) Gradasi agregat sesuai SNI 03-2834-2000.

- 2) Kekerasan (Abrasi Los Angeles): maksimum 40% untuk lapisan aus.
 - 3) Nilai kepipihan (*flakiness index*): maksimal 25%.
 - 4) Kandungan debu (*fine materials*): maksimum 1% yang lolos saringan No. 200.
- b. Aspal
- Aspal adalah pengikat utama dalam perkerasan lentur. Spesifikasi umum membagi aspal menjadi:
- 1) Aspal keras (penetration grade 60/70 atau 80/100) – untuk daerah panas dan beban berat.
 - 2) Aspal cair (*cutback*) – digunakan untuk *prime coat*.
 - 3) Asphalt emulsion – digunakan untuk *tack coat* dan pekerjaan pemeliharaan.
- Kriteria teknis aspal mengacu pada SNI 06-2456-1991 dan revisi terbaru seperti SNI 06-2433-2011 yang mengatur penetrasi, titik lembek, titik nyala, dan viskositas.
- c. Filler (bahan pengisi)
- Filler seperti abu batu digunakan untuk mengisi rongga antar agregat. Filler harus memiliki:
- 1) Kehalusan tinggi (minimum lolos 75 μm sebesar 70%).
 - 2) Tidak bereaksi negatif terhadap aspal.
 - 3) Kadar air rendah (SNI 03-6815-2002).

2. Material untuk Perkerasan Kaku (*Rigid Pavement*)

- a. Semen
- Jenis semen yang digunakan umumnya adalah Semen Portland Tipe I atau II, sesuai SNI 15-2049-2004. Persyaratan teknis mencakup:
- 1) Kuat tekan minimum 41,3 MPa untuk 28 hari.
 - 2) Bebas dari gumpalan, bahan organik, dan garam.
 - 3) Kehalusan semen harus sesuai ketentuan Blaine fineness.
- Semen harus disimpan dalam kondisi kering dan tidak lebih dari 3 bulan untuk menjaga kualitasnya.
- b. Agregat (Kasar dan Halus)
- Agregat untuk beton semen memiliki syarat yang lebih ketat dibanding perkerasan lentur. Spesifikasi teknis mengatur:
- 1) Agregat halus: pasir alami dengan modulus kehalusan 2,3–3,1.

- 2) Agregat kasar: batu pecah dengan ukuran maksimum 37,5 mm.
- 3) Reaktivitas alkali agregat terhadap semen harus rendah ($AAR < 0,10\%$).

Menurut SNI 03-2847-2019, agregat juga harus memiliki kadar lumpur $< 3\%$ dan nilai abrasi $< 40\%$.

c. Air Pencampur

Air yang digunakan dalam campuran beton harus bersih dan tidak mengandung zat berbahaya. Parameter teknis mencakup:

- 1) pH: 6–8,5.
- 2) Tidak mengandung minyak, asam, atau alkali kuat.
- 3) Total zat terlarut (TDS) tidak melebihi 2000 ppm.

3. Material untuk Lapisan Pondasi (*Base dan Subbase*)

Lapisan pondasi membutuhkan material yang kuat, tahan air, dan memiliki stabilitas tinggi. Material yang umum digunakan antara lain:

a. Agregat Granular

Material granular untuk subbase harus memenuhi syarat:

- 1) CBR minimum 30% untuk subbase dan 80% untuk base.
- 2) Ukuran maksimum 63 mm.
- 3) Kadar debu $< 10\%$.
- 4) Kepadatan minimum 95% Modified Proctor (SNI 1969:2008).

b. Material Campuran Tanah-Agregat

Bahan lokal seperti sirtu dan laterit dapat digunakan jika distabilisasi. Stabilitas dapat dicapai melalui pencampuran dengan semen, kapur, atau bitumen.

- 1) Nilai CBR setelah stabilisasi minimum 40%.
- 2) Kadar air optimum harus ditentukan melalui uji laboratorium.

4. Tanah Dasar (*Subgrade*)

Tanah dasar berperan sebagai fondasi struktur jalan dan harus memenuhi persyaratan:

- a. Nilai CBR minimum 6% untuk jalan arteri dan 5% untuk jalan kolektor.
- b. Kepadatan minimum 95% dari Modified Proctor.

- c. Daya dukung tanah diuji menggunakan metode DCP atau uji CBR lapangan.

SNI 1969:2008 juga menetapkan kriteria plastisitas, kadar air maksimum, dan pembatasan penggunaan tanah ekspansif.

5. Material Stabilisasi dan Geotekstil

Untuk daerah dengan tanah lemah, material stabilisasi digunakan untuk memperkuat tanah dasar atau subbase. Jenis stabilisasi antara lain:

- a. Kapur (CaO): untuk menstabilkan tanah lempung plastis.
- b. Semen: untuk meningkatkan kekuatan geser dan CBR tanah.
- c. Bitumen: untuk menstabilkan material granular.
- d. Geotekstil: untuk memperkuat tanah dan mencegah kontaminasi antar lapisan.

6. Pengujian dan Pengendalian Mutu Material

Setiap material yang digunakan dalam konstruksi jalan harus melalui tahapan pengujian yang ketat, baik di laboratorium maupun lapangan, mencakup:

- a. Uji gradasi saringan (ASTM C136).
- b. Uji CBR (SNI 1744:2012).
- c. Uji kadar air (ASTM D2216).
- d. Uji abrasi (ASTM C131/C535).
- e. Uji kelekatan aspal terhadap agregat (boiling test).

Prosedur pengujian harus dilakukan oleh laboratorium bersertifikat dan hasilnya dilaporkan dalam dokumen kontrak sebagai bagian dari sistem pengendalian mutu (QA/QC).

7. Spesifikasi Material Lokal dan Alternatif

Bina Marga dan BSN juga mengakomodasi penggunaan material lokal dan material daur ulang yang memiliki nilai ekonomis dan ramah lingkungan, dengan ketentuan:

- a. Dilakukan uji performa jangka panjang.
- b. Tidak mengandung zat berbahaya.
- c. Memenuhi parameter minimum kekuatan dan durabilitas.

C. Kriteria Desain Perkerasan Menurut Standar

Desain perkerasan jalan merupakan salah satu aspek penting dalam konstruksi jalan yang bertujuan untuk menentukan ketebalan dan jenis lapisan perkerasan yang mampu menahan beban lalu lintas dan kondisi lingkungan selama umur layan jalan. Dua pendekatan yang paling banyak digunakan dalam desain perkerasan adalah pendekatan dari *American Association of State Highway and Transportation Officials* (AASHTO) dan Direktorat Jenderal Bina Marga Kementerian PUPR (Indonesia). Masing-masing standar menyediakan metodologi yang sistematis berdasarkan data lalu lintas, kekuatan tanah dasar, kondisi iklim, serta keandalan struktur jalan yang diinginkan. Meskipun berbeda dalam pendekatan matematis, keduanya berupaya menghasilkan desain struktur perkerasan yang optimal, efisien, dan berkelanjutan.

1. Metodologi Desain AASHTO (*American Association of State Highway and Transportation Officials*)

Metode desain AASHTO bermula dari uji jalan AASHO Road Test pada tahun 1958–1960 dan dikembangkan menjadi standar desain struktural dalam dokumen AASHTO Guide for Design of Pavement Structures 1993. Versi ini kemudian diperbaharui dalam AASHTO *Mechanistic-Empirical Pavement Design Guide* (MEPDG) dan *AASHTOWare Pavement ME Design* (2015, 2020).

a. Desain Perkerasan Lentur

Rumus dasar desain AASHTO 1993 untuk perkerasan lentur adalah:

$$\log(W18) = ZR \times S_0 + 9.36 \times \log(SN + 1) - 0.20 + \log(\Delta PSI / (4.2 - 1.5)) / [0.4 + (1094 / (SN + 1)^{5.19})] + 2.32 \times \log(Mr) - 8.07$$

Dimana:

- 1) W18 = ekivalen beban sumbu tunggal 18 kips (ESAL)
- 2) ZR = nilai distribusi keandalan (reliability)
- 3) S₀ = deviasi standar
- 4) SN = nilai struktural total
- 5) ΔPSI = perubahan indeks kondisi pelayanan
- 6) Mr = modulus elastisitas tanah dasar (psi)

Nilai struktural (SN) ditentukan berdasarkan kontribusi masing-masing lapisan:

$$SN = a_1 \times D_1 + a_2 \times D_2 \times m_2 + a_3 \times D_3 \times m_3$$

Dimana:

- 1) a_i = koefisien struktural material
- 2) D_i = ketebalan lapisan
- 3) m_i = koefisien drainase

b. Desain Perkerasan Kaku

Untuk perkerasan kaku, AASHTO memperhitungkan modulus reaksi tanah dasar (k), modulus elastisitas beton (E_c), tebal pelat (D), dan nilai *load transfer coefficient* (J). Kriteria kegagalan dilihat dari fatigue cracking dan faulting.

Pendekatan empiris diubah menjadi pendekatan mekanistik-empiris dalam Pavement ME Design (2015–2020) dengan mempertimbangkan:

- 1) Tegangan dan regangan dalam struktur.
- 2) Respon dinamis terhadap beban berulang.
- 3) Lingkungan dan siklus freeze-thaw.
- 4) Penurunan kinerja (*rutting, cracking, IRI*).

(MEPDG memperkenalkan pemodelan prediktif berbasis data simulasi dan pengujian laboratorium.)

2. Metodologi Desain Bina Marga (Indonesia)

Metode desain perkerasan di Indonesia mengikuti dokumen:

a. Manual Desain Perkerasan Jalan (MDPJ)

MDPJ membagi desain berdasarkan kategori lalu lintas dan klasifikasi jalan (arteri, kolektor, lokal, dan lingkungan) serta umur rencana 10–20 tahun.

1) Desain Perkerasan Lentur

Metode Bina Marga menggunakan pendekatan kumulatif beban lalu lintas harian dalam ekivalen beban sumbu standar (ESAL) yang dihitung berdasarkan data lalu lintas dan faktor pengali.

Komponen utama desain:

- a) Cumulative ESAL (CESA): total beban selama umur rencana.
- b) CBR tanah dasar: diuji lapangan.
- c) Modulus elastisitas lapisan: berdasarkan tabel empiris.
- d) Faktor bentuk kendaraan: diambil dari data survei jalan nasional.

Ketebalan lapisan ditentukan melalui grafik desain (*chart*) atau dengan menggunakan perangkat lunak Kenlayer atau KENPAVE, yang mengakomodasi pendekatan mekanistik sederhana.

2) Desain Perkerasan Kaku

Perkerasan kaku dirancang dengan mempertimbangkan:

- Beban lalu lintas (ESAL).
- Modulus elastisitas beton (E): $\pm 4.000\text{--}5.000$ MPa.
- Koefisien reaksi tanah (k): dari uji plate bearing test.
- Ketebalan pelat beton: $\pm 200\text{--}300$ mm.
- Panjang panel beton: sesuai standar 4–5 m, untuk menghindari cracking.

Faktor koreksi untuk pengaruh temperatur dan sambungan juga diperhitungkan.

3. Komparasi antara AASHTO dan Bina Marga

Aspek	AASHTO	Bina Marga
Basis desain	Empiris → Mekanistik-Empiris	Semi-Empiris dan Mekanistik
Input lalu lintas	ESAL, axle configuration	ESAL, faktor kendaraan
Faktor keandalan	ZR, S0 (statistik)	Tidak eksplisit
Penyesuaian lingkungan	Freeze-thaw, temperature	Iklim umum (Indonesia tropis)
Analisis retak & deformasi	Ya, sangat detail	Terbatas (digunakan grafik/manual)

4. Faktor Penentu dalam Desain

a. Volume Lalu Lintas Harian (LHR)

Volume Lalu Lintas Harian (LHR) merupakan salah satu faktor utama dalam perancangan jalan, terutama dalam menentukan ketahanan dan ketebalan struktur perkerasan. LHR menunjukkan jumlah kendaraan yang melewati suatu ruas jalan dalam satu hari, yang kemudian digunakan untuk memperkirakan beban lalu lintas selama umur rencana jalan. Data LHR diperoleh melalui pengamatan lalu lintas jangka panjang dengan berbagai metode,

seperti manual counting, sensor otomatis, dan teknologi kamera, guna mendapatkan angka yang representatif dan akurat.

b. *Subgrade* (Tanah Dasar)

Subgrade atau tanah dasar merupakan salah satu faktor krusial dalam desain perkerasan jalan karena menjadi lapisan penopang utama bagi seluruh struktur jalan. Kualitas dan kekuatan tanah dasar sangat memengaruhi kemampuan jalan dalam menahan beban lalu lintas. Oleh sebab itu, karakteristik *Subgrade* perlu diuji secara teliti sebelum perencanaan desain dilakukan. Dua parameter utama yang sering digunakan dalam pengujian tanah dasar adalah *California Bearing Ratio* (CBR) dan modulus reaksi (k).

c. Umur Rencana

Umur rencana merupakan salah satu faktor penting yang harus dipertimbangkan dalam desain perkerasan jalan karena menentukan periode waktu perkerasan diharapkan dapat berfungsi secara optimal tanpa perlu perbaikan besar. Penentuan umur rencana yang tepat sangat krusial agar desain jalan mampu menahan beban lalu lintas dan kondisi lingkungan selama periode tersebut, sehingga biaya pemeliharaan dan rehabilitasi dapat diminimalkan.

d. Keandalan Desain

Keandalan desain merupakan aspek krusial dalam perencanaan perkerasan jalan yang bertujuan untuk memastikan bahwa struktur jalan mampu berfungsi secara optimal selama umur rencana dengan risiko kegagalan yang minimal. Dalam standar internasional seperti AASHTO (*American Association of State Highway and Transportation Officials*), keandalan desain diukur secara statistik menggunakan parameter seperti nilai ZR (nilai distribusi normal standar) dan S0 (deviasi standar), yang mencerminkan probabilitas kegagalan dan variabilitas beban serta material (AASHTO, 1993). Pendekatan ini memberikan kerangka kerja kuantitatif untuk menilai risiko dan mengatur margin keamanan berdasarkan data probabilistik.



BAB III

KARAKTERISTIK DAN PEMILIHAN MATERIAL

Pada proses konstruksi perkerasan jalan, pemilihan material yang tepat merupakan faktor fundamental yang menentukan kualitas, kekuatan, dan umur layanan jalan. Material yang digunakan harus memenuhi spesifikasi teknis yang sesuai standar agar dapat menahan beban lalu lintas dan kondisi lingkungan yang terus berubah. Karakteristik fisik dan mekanis dari setiap jenis material harus dianalisis secara detail agar bisa memberikan kinerja struktural yang optimal. Oleh karena itu, pemahaman mendalam terhadap sifat-sifat material seperti tanah dasar, agregat, aspal, semen, serta bahan tambahan menjadi hal yang sangat penting dalam perencanaan dan pelaksanaan konstruksi jalan.

Tanah dasar berperan sebagai fondasi utama dari perkerasan dan harus distabilisasi apabila daya dukung tanah tidak mencukupi. Agregat, baik kasar maupun halus, digunakan sebagai bahan pembentuk lapisan pondasi dan permukaan, dan harus memiliki kekuatan dan ketahanan terhadap deformasi. Sementara itu, aspal digunakan sebagai bahan pengikat dalam perkerasan lentur dan harus diuji terhadap viskositas, titik lembek, dan stabilitas termal. Beton dan semen, yang digunakan dalam perkerasan kaku, juga memerlukan pengujian terhadap kuat tekan, workability, dan durabilitas. Selain itu, teknologi modern juga memungkinkan pemanfaatan material tambahan seperti geotekstil, limbah industri (*fly ash*), dan bahan daur ulang (RAP) sebagai solusi keberlanjutan dalam pembangunan infrastruktur jalan.

A. Tanah Dasar dan Stabilisasi Tanah

Tanah dasar atau *Subgrade* merupakan elemen utama dalam sistem struktur perkerasan jalan yang berfungsi sebagai penopang beban

dari lapisan-lapisan di atasnya. Karakteristik tanah dasar sangat menentukan kinerja dan umur layan jalan. Kelemahan pada tanah dasar, seperti daya dukung rendah, plastisitas tinggi, atau perubahan volume karena kadar air, dapat menyebabkan kegagalan dini pada konstruksi jalan. Oleh karena itu, pemilihan dan perlakuan terhadap tanah dasar melalui teknik stabilisasi menjadi bagian vital dalam perencanaan jalan yang andal.

1. Tanah Dasar

Tanah dasar adalah lapisan paling bawah dari struktur jalan yang merupakan tanah asli (in situ) atau tanah hasil timbunan yang telah dipadatkan. Fungsi utamanya adalah untuk:

- a. Menyediakan dukungan terhadap beban lalu lintas,
- b. Menjaga kestabilan struktur perkerasan,
- c. Meminimalkan deformasi atau penurunan diferensial.

Karakteristik mekanik tanah dasar yang umumnya dianalisis antara lain:

- a. *California Bearing Ratio* (CBR): Menunjukkan daya dukung tanah terhadap pembebanan.
- b. Modulus Elastisitas (E): Menggambarkan kekakuan tanah.
- c. Plastisitas (PI): Mempengaruhi kestabilan terhadap perubahan kadar air.
- d. Kepadatan (γ): Terkait dengan berat jenis dan kekuatan geser.
- e. Permeabilitas: Mempengaruhi kerentanan terhadap perubahan air tanah.

Tanah dengan nilai CBR di bawah 6% dikategorikan sebagai tanah lemah dan umumnya memerlukan perlakuan stabilisasi atau penggantian. (SNI 7974:2013) Penentuan klasifikasi tanah dilakukan dengan metode:

- a. *Unified Soil Classification System* (USCS)
- b. AASHTO Soil Classification
- c. SNI 03-1964-1990

Pada klasifikasi AASHTO, jenis tanah digolongkan ke dalam kelompok A-1 sampai A-7, di mana kelompok A-1 memiliki kualitas terbaik, sedangkan A-7 memiliki plastisitas tinggi dan kualitas rendah. Klasifikasi tanah sangat penting dalam menentukan jenis perlakuan stabilisasi yang diperlukan serta tebal lapisan perkerasan yang optimal. Tanah dasar sering mengalami permasalahan seperti:

- a. Daya dukung rendah: Tidak mampu menahan beban lalu lintas.
- b. Ekspansif: Volume berubah akibat perubahan kadar air (misal tanah lempung).
- c. Rendahnya permeabilitas: Menyebabkan genangan air dan kerusakan struktural.
- d. Kondisi organik atau gambut: Tidak stabil, rentan terhadap konsolidasi dan penurunan.

Penanganan tanah seperti ini memerlukan teknik stabilisasi yang tepat agar memenuhi spesifikasi teknis dan umur rencana jalan.

2. Stabilisasi Tanah

Stabilisasi tanah adalah upaya meningkatkan sifat fisik dan mekanik tanah agar memenuhi persyaratan teknis sebagai tanah dasar jalan. Tujuan stabilisasi mencakup:

- a. Meningkatkan kekuatan geser,
- b. Menurunkan plastisitas,
- c. Meningkatkan daya dukung (CBR),
- d. Menurunkan perubahan volume (swelling),
- e. Meningkatkan daya tahan terhadap air.

1) Stabilisasi Mekanis

Stabilisasi mekanis merupakan metode perbaikan tanah dasar yang dilakukan dengan mencampur dua atau lebih jenis tanah untuk mencapai komposisi yang optimal sehingga meningkatkan daya dukung dan kestabilan tanah. Misalnya, pencampuran pasir dengan lempung dapat menghasilkan campuran yang memiliki sifat mekanik lebih baik dibandingkan tanah asli. Proses ini bertujuan untuk mengurangi kadar air, memperbaiki struktur butiran tanah, dan meningkatkan kekuatan geser, sehingga tanah menjadi lebih kokoh dan mampu mendukung beban lalu lintas jalan.

2) Stabilisasi Kimia

Penggunaan bahan tambahan kimia untuk meningkatkan sifat tanah, antara lain:

a) Kapur (CaO)

Stabilisasi kimia dengan menggunakan kapur (CaO) merupakan metode yang efektif untuk memperbaiki sifat mekanik tanah lempung yang memiliki plastisitas tinggi dan daya dukung rendah. Ketika kapur ditambahkan ke

tanah lempung, terjadi reaksi kimia antara kapur dengan mineral liat yang menghasilkan senyawa kalsium silikat hidrat (C-S-H). Senyawa ini berfungsi sebagai perekat yang mengikat partikel-partikel tanah, sehingga meningkatkan kekuatan dan kestabilan struktur tanah secara signifikan.

b) Semen Portland

Stabilisasi kimia dengan menggunakan semen Portland merupakan metode yang banyak diterapkan untuk meningkatkan sifat mekanik berbagai jenis tanah, terutama tanah lunak dan berbutir halus. Ketika semen dicampurkan dengan tanah dan bereaksi dengan air (proses hidrasi), terbentuk ikatan kimia yang memperkuat kohesi antar partikel tanah. Reaksi ini menghasilkan senyawa kalsium silikat hidrat yang meningkatkan kuat tekan tanah secara signifikan, sehingga tanah menjadi lebih padat dan stabil. Penggunaan semen Portland dalam campuran tanah biasanya berkisar antara 5 hingga 10 persen dari berat tanah untuk mencapai peningkatan daya dukung yang optimal. Selain meningkatkan kekuatan tekan, semen juga meningkatkan ketahanan tanah terhadap air dan mengurangi deformasi akibat perubahan kadar air, sehingga membuat struktur tanah lebih tahan terhadap pengaruh lingkungan.

c) *Fly Ash* (Abu Terbang)

Fly ash atau abu terbang adalah limbah hasil pembakaran batu bara di pembangkit listrik tenaga uap yang memiliki sifat puzolanik, yaitu kemampuan bereaksi dengan kapur atau semen untuk membentuk senyawa pengikat yang memperkuat struktur tanah. Ketika *fly ash* dicampur dengan kapur atau semen, reaksi kimia yang terjadi menghasilkan kalsium silikat hidrat (C-S-H) yang meningkatkan kekuatan dan stabilitas tanah, khususnya pada jenis tanah lempung atau lanau yang cenderung lunak dan plastis. Penggunaan *fly ash* sebagai bahan stabilisasi kimia juga memiliki nilai tambah dari segi keberlanjutan, karena dapat memanfaatkan limbah

industri sekaligus mengurangi kebutuhan bahan semen yang lebih mahal dan berdampak lingkungan lebih besar.

d) Bitumen

Bitumen digunakan sebagai bahan stabilisasi kimia pada tanah granular untuk meningkatkan sifat fisik dan mekanisnya. Dengan penambahan bitumen, permeabilitas tanah dapat dikurangi secara signifikan, sehingga air sulit meresap ke dalam lapisan tanah. Hal ini penting untuk mencegah pelunakan dan kerusakan struktur jalan akibat kelembaban berlebih. Selain itu, bitumen juga menambah kohesi antar partikel tanah, sehingga meningkatkan kekuatan dan kestabilan tanah dasar yang mendukung perkerasan jalan. Penggunaan bitumen pada stabilisasi tanah granular efektif dalam kondisi lalu lintas ringan hingga menengah dan daerah dengan curah hujan tinggi. Selain memperbaiki daya dukung tanah, bitumen juga memberikan ketahanan terhadap erosi dan deformasi akibat beban lalu lintas.

e) Polimer Sintetis dan Enzim

Polimer sintetis dan enzim merupakan inovasi terbaru dalam teknologi stabilisasi kimia tanah yang mulai banyak digunakan dalam pembangunan infrastruktur jalan modern. Bahan-bahan ini memiliki keunggulan ramah lingkungan karena tidak mengandung zat berbahaya dan dapat terurai secara alami di lingkungan. Polimer sintetis berfungsi sebagai pengikat partikel tanah sehingga meningkatkan kohesi dan kekuatan mekanik tanah dasar, sedangkan enzim bekerja mempercepat reaksi kimia yang menguatkan struktur tanah dengan cara meningkatkan adhesi antar partikel. Keunggulan stabilisasi menggunakan polimer dan enzim adalah kemampuannya untuk disesuaikan dengan karakteristik tanah yang berbeda, baik tanah liat, lanau, maupun pasir.

3) Stabilisasi *Geotekstil* dan Geosintetik

Stabilisasi tanah menggunakan *Geotekstil* dan geosintetik telah menjadi solusi efektif dalam menghadapi tantangan tanah lunak dan kondisi lahan rawa, yang sering ditemukan di berbagai wilayah Indonesia. *Geotekstil* adalah bahan

sintetis berupa lembaran atau anyaman yang diletakkan di antara lapisan tanah untuk meningkatkan kekuatan dan stabilitas struktur tanah dasar. Fungsi utama *Geotekstil* adalah sebagai pemisah (*separation*), penguat (*reinforcement*), dan pengatur drainase (*filtration* dan *drainage*), yang membantu menjaga kestabilan perkerasan jalan serta mencegah pencampuran material tanah yang berbeda.

B. Agregat (Kasar dan Halus): Sifat Fisik dan Mekanis

Agregat merupakan komponen utama dalam campuran perkerasan jalan, baik pada lapisan pondasi maupun lapisan permukaan. Dalam struktur perkerasan jalan, agregat dapat mencakup antara 60% hingga 75% dari total volume campuran, sehingga mutu agregat sangat menentukan kekuatan, durabilitas, dan stabilitas dari perkerasan itu sendiri. Agregat terdiri dari dua jenis utama, yaitu agregat kasar dan agregat halus. Keduanya memiliki karakteristik fisik dan mekanis yang spesifik serta harus memenuhi kriteria teknis yang telah ditetapkan oleh standar nasional dan internasional seperti SNI, Bina Marga, dan AASHTO.

Agregat kasar merupakan partikel batuan dengan ukuran lebih besar dari 4,75 mm (No. 4 sieve). Agregat ini umumnya berasal dari batu pecah (*crushed stone*), kerikil alami (*gravel*), atau batuan hasil rekayasa (*manufactured aggregates*). Sementara itu, agregat halus adalah material granular dengan ukuran butiran lolos saringan No. 4 (4,75 mm) dan tertahan pada saringan No. 200 (0,075 mm). Agregat halus biasanya berupa pasir alami, pasir hasil pecahan batu, atau campuran keduanya.

1. Sifat Fisik Agregat

a. Ukuran dan Distribusi Butiran (Gradasi)

Gradasi agregat menunjukkan distribusi ukuran partikel dalam suatu sampel agregat. Gradasi yang baik akan menghasilkan campuran yang padat dan kuat.

- 1) Gradasi kontinu (*well-graded*) menghasilkan stabilitas dan kepadatan tinggi.
- 2) Gradasi seragam (*uniform*) cenderung memiliki rongga lebih banyak dan memerlukan filler.

- 3) Gradasi terbuka (*gap graded*) digunakan dalam campuran tertentu seperti AC-WC.
Gradasi dinyatakan dalam grafik kurva distribusi berdasarkan uji saringan (ASTM C136).
- b. Bentuk dan Tekstur Permukaan
Agregat berbentuk kubikal dengan permukaan kasar lebih disukai karena memberikan ikatan yang lebih kuat dalam campuran.
 - 1) Bentuk tidak bulat meningkatkan kohesi, tetapi terlalu bersudut dapat mengganggu *workability*.
 - 2) Tekstur permukaan kasar meningkatkan adhesi dengan pengikat (aspal atau semen).
- c. Berat Jenis dan Penyerapan Air
 - 1) Berat jenis (*specific gravity*): Menunjukkan kepadatan relatif dari agregat terhadap air. Nilai normal berkisar antara 2,5 – 2,7.
 - 2) Penyerapan air (*water absorption*): Menunjukkan kemampuan agregat menyerap air. Agregat dengan daya serap tinggi dapat mempengaruhi proporsi campuran aspal dan kualitas ikatan.
Agregat yang baik memiliki penyerapan air $< 3\%$ untuk mencegah perubahan kadar air yang signifikan saat pencampuran.
- d. Kebersihan Agregat
Kebersihan agregat merupakan salah satu aspek penting dalam menentukan kualitas bahan konstruksi, khususnya untuk perkerasan jalan. Agregat yang digunakan harus bebas dari kontaminan seperti debu, tanah liat, dan zat organik yang dapat menurunkan kekuatan dan daya tahan campuran beton atau aspal. Kehadiran material halus dan zat organik ini dapat mengganggu ikatan antara agregat dan bahan pengikat seperti semen atau aspal, sehingga berpotensi menyebabkan kerusakan pada struktur jalan, seperti retak dan pengelupasan.

2. Sifat Mekanis Agregat

a. Ketahanan Aus (*Los Angeles Abrasion Test*)

Menunjukkan daya tahan agregat terhadap abrasi akibat gesekan dan benturan. Nilai abrasi yang tinggi menandakan agregat mudah hancur.

1) Nilai LA Abrasion yang baik untuk lapisan permukaan jalan aspal adalah $< 40\%$.

2) Untuk lapisan pondasi, nilai maksimal biasanya $< 50\%$.

b. Kuat Tekan dan Kuat Pecah

1) Crushing strength: Diuji dengan *aggregate crushing value* (ACV).

2) Impact value: Menunjukkan ketahanan terhadap beban kejut. Agregat dengan ACV rendah ($< 25\%$) dianggap memiliki kekuatan tinggi dan cocok untuk beban lalu lintas berat.

c. Ketahanan terhadap Cuaca dan Pembekuan

Ketahanan agregat terhadap perubahan cuaca, khususnya siklus pembekuan dan pencairan, menjadi faktor penting dalam memastikan durabilitas dan ketahanan struktur perkerasan jalan. Pada daerah dengan iklim ekstrem yang mengalami suhu rendah, air yang meresap ke dalam pori-pori agregat dapat membeku dan mengembang, menyebabkan kerusakan fisik seperti retak dan pengelupasan pada agregat. Jika agregat tidak memiliki ketahanan yang memadai terhadap siklus freeze-thaw ini, maka struktur jalan menjadi rentan terhadap kerusakan dini yang dapat mengurangi umur layanan jalan secara signifikan.

3. Perbandingan Agregat Kasar dan Halus

Karakteristik	Agregat Kasar	Agregat Halus
Ukuran	$> 4,75$ mm	0,075 – 4,75 mm
Fungsi utama	Memberi kekuatan struktural	Mengisi rongga antar agregat kasar
Tekstur	Kasar, bersudut	Lebih halus
Pengaruh pada stabilitas	Tinggi	Sedang
Standar gradasi	SNI 03-1968-1990	SNI 03-4142-1996

4. Sumber dan Kualitas Agregat di Indonesia

a. Agregat Alam

Agregat alam di Indonesia umumnya berasal dari sumber-sumber seperti kerikil sungai dan pasir pantai yang tersebar di berbagai daerah. Agregat ini sangat mudah diperoleh karena keberadaannya yang melimpah dan akses yang relatif mudah, sehingga sering digunakan dalam konstruksi jalan dan bangunan. Kerikil sungai biasanya memiliki bentuk yang lebih bulat dan halus karena proses pelapukan alami oleh aliran air, sementara pasir pantai memiliki butiran yang lebih halus dan cenderung mengandung kadar garam yang tinggi.

b. Agregat Batu Pecah

Agregat batu pecah di Indonesia berasal dari batuan alam seperti andesit, basalt, dan granit yang dihasilkan melalui proses pemecahan batu besar menjadi ukuran yang diinginkan. Batu pecah ini memiliki kekuatan yang tinggi dan kekerasan yang baik, sehingga sangat cocok untuk digunakan sebagai material konstruksi yang membutuhkan daya tahan dan stabilitas, terutama pada struktur perkerasan jalan. Bentuk agregat yang bersudut tajam memberikan keunggulan dalam hal ikatan dengan bahan pengikat seperti aspal dan semen, sehingga meningkatkan kekuatan dan kestabilan perkerasan.

c. Agregat Buatan dan Daur Ulang

Agregat buatan dan daur ulang mulai banyak digunakan di Indonesia sebagai alternatif untuk mengurangi ketergantungan pada sumber agregat alam yang terbatas. Contoh agregat buatan meliputi slag baja, yaitu produk sampingan dari proses peleburan baja yang memiliki kekuatan dan kestabilan cukup baik untuk konstruksi jalan. Selain itu, beton daur ulang (*Recycled Concrete Aggregate/RCA*) dan limbah konstruksi juga dimanfaatkan sebagai bahan agregat dalam pembangunan infrastruktur. Penggunaan bahan ini selain ramah lingkungan juga membantu mengurangi limbah konstruksi yang dapat mencemari lingkungan.

5. Evaluasi Kualitas Agregat di Laboratorium

Beberapa uji standar yang umum digunakan dalam mengevaluasi agregat antara lain:

Nama Uji	Fungsi	SNI/ASTM
Uji Gradasi	Distribusi ukuran butir	SNI 03-1968-2008
LA Abrasion	Ketahanan aus	SNI 03-2417-1991
Uji Berat Jenis dan Penyerapan	Massa jenis dan daya serap	SNI 03-1969-2008
Sand Equivalent	Kebersihan agregat halus	SNI 03-4428-1997
Uji Kuat Hancur (ACV)	Ketahanan tekan	ASTM C131

C. Aspal: Jenis, Sifat, dan Pengujian

Aspal merupakan material pengikat utama dalam konstruksi perkerasan lentur (*flexible pavement*). Keandalan dan kualitas aspal sangat menentukan umur teknis perkerasan jalan karena berperan sebagai bahan pengikat antara agregat. Dalam praktiknya, berbagai jenis aspal digunakan tergantung pada kondisi iklim, lalu lintas, dan jenis lapisan perkerasan. Pemahaman yang komprehensif mengenai jenis, sifat, dan pengujian aspal sangat penting dalam proses perencanaan, desain, serta pelaksanaan proyek jalan raya. Menurut *American Association of State Highway and Transportation Officials* (AASHTO) dan Direktorat Jenderal Bina Marga, aspal harus memiliki karakteristik tertentu seperti daya lekat tinggi, plastisitas cukup, stabil terhadap perubahan suhu, dan tahan terhadap kerusakan akibat lalu lintas dan air.

1. Jenis-Jenis Aspal

a. Aspal Keras (*Asphalt Cement / Penetration Grade*)

Aspal keras adalah jenis aspal yang digunakan dalam bentuk murni tanpa penambahan pelarut atau bahan modifikasi. Aspal jenis ini diklasifikasikan berdasarkan angka penetrasi, seperti aspal penetrasi 60/70, 80/100, dan sebagainya.

- 1) Penetrasi 60/70 merupakan tipe yang paling umum digunakan di Indonesia karena memiliki kestabilan tinggi terhadap suhu tropis dan lalu lintas berat.
- 2) Standar teknis: SNI 06-2456-1991 dan SNI 06-2467-1991

b. Aspal Emulsi

Aspal emulsi adalah aspal keras yang dicampur dengan air dan bahan emulsifier, sehingga bersifat cair dan mudah digunakan pada suhu rendah. Cocok untuk pekerjaan perawatan jalan seperti *prime coat*, *tack coat*, dan *slurry seal*.

1) Jenis emulsi: Kationik (K) dan Anionik (A), misalnya K1-40, K1-60, A1-50.

2) Tidak memerlukan pemanasan tinggi saat aplikasi.

c. Aspal Modifikasi (*Polymer Modified Asphalt* – PMA)

Aspal modifikasi adalah aspal keras yang dicampur dengan bahan tambahan seperti *styrene-butadiene-styrene* (SBS), crumb rubber, atau plastomer. PMA digunakan pada jalan dengan beban lalu lintas berat, suhu ekstrem, atau daerah rawan retak.

1) Peningkatan elastisitas, viskositas, dan ketahanan terhadap deformasi permanen (*rutting*).

2) Telah diadopsi dalam proyek jalan tol dan bandara di Indonesia (Bina Marga, 2022).

d. Aspal Buton (Asbuton)

Aspal alami dari Pulau Buton (Sulawesi Tenggara), terdiri dari aspal alam dan agregat. Telah dikembangkan dalam berbagai bentuk seperti:

1) Asbuton granular (untuk campuran panas)

2) Asbuton halus (untuk lapis penetrasi makadam)

Kelebihan asbuton meliputi ketersediaan lokal dan sifat ikat yang kuat, namun masih menghadapi tantangan dalam hal standarisasi dan konsistensi kualitas.

2. Sifat-Sifat Aspal

a. Sifat Fisik

1) Penetrasi (*Penetration*)

Sifat fisik aspal yang penting untuk diketahui adalah penetrasi, yang mengukur konsistensi atau kekerasan aspal pada suhu tertentu. Penetrasi dilakukan dengan cara mengukur kedalaman jarum standar yang menembus permukaan aspal pada suhu 25°C selama 5 detik. Hasil pengukuran ini menunjukkan seberapa lunak atau keras aspal tersebut. Aspal dengan nilai penetrasi rendah menunjukkan bahwa material tersebut cukup keras, sehingga lebih tahan

terhadap deformasi plastis saat digunakan sebagai bahan perkerasan jalan. Sebaliknya, nilai penetrasi tinggi menandakan aspal yang lebih lunak dan fleksibel, yang cocok untuk kondisi suhu rendah atau kebutuhan elastisitas tertentu. Pengujian penetrasi ini diatur dalam standar nasional Indonesia (SNI 06-2456-1991) untuk memastikan konsistensi dan kualitas aspal yang digunakan dalam konstruksi jalan.

2) Titik Lembek (*Softening Point*)

Titik lembek (*softening point*) merupakan salah satu sifat fisik penting dari aspal yang menunjukkan suhu di mana aspal mulai melunak dan berubah dari keadaan padat menjadi lebih cair. Parameter ini sangat berguna untuk menilai stabilitas aspal terhadap suhu tinggi, terutama di daerah dengan iklim panas atau kondisi lingkungan yang dapat menyebabkan pemanasan permukaan jalan. Aspal dengan titik lembek tinggi memiliki ketahanan lebih baik terhadap deformasi permanen seperti pelelehan atau pelebaran saat suhu meningkat, sehingga lebih cocok digunakan pada perkerasan jalan yang mengalami beban lalu lintas berat.

3) Titik Nyala (*Flash Point*)

Titik nyala (*Flash Point*) adalah suhu minimum di mana uap yang dihasilkan oleh aspal dapat menyala apabila terkena sumber api. Parameter ini sangat penting dalam aspek keselamatan kerja, terutama saat proses pengolahan, pemanasan, dan pengaplikasian aspal di lapangan. Mengetahui titik nyala aspal membantu mencegah risiko kebakaran atau ledakan selama penanganan material, sehingga menjadi standar pengujian wajib untuk memastikan keamanan pekerja dan lingkungan sekitar proyek konstruksi jalan.

4) Berat Jenis (*Specific Gravity*)

Berat jenis atau *specific gravity* adalah salah satu sifat fisik penting pada aspal yang digunakan untuk menentukan massa jenis relatif terhadap air. Parameter ini sangat berguna dalam perhitungan volume campuran aspal saat proses pencampuran dan pengaplikasian di lapangan. Dengan mengetahui berat jenis aspal, insinyur dapat menghitung proporsi bahan yang tepat agar campuran aspal memiliki

komposisi dan kepadatan sesuai dengan spesifikasi teknis yang diinginkan.

b. Sifat Termal

Sifat termal aspal sangat penting dalam menentukan ketahanan dan performa lapisan perkerasan jalan, terutama di daerah dengan iklim tropis seperti Indonesia. Aspal harus mampu menahan suhu tinggi tanpa mengalami deformasi permanen atau rutting, yaitu deformasi yang menyebabkan permukaan jalan menjadi bergelombang akibat tekanan lalu lintas. Kemampuan ini dikenal sebagai daya tahan terhadap suhu tinggi atau rutting resistance. Aspal yang stabil pada suhu tinggi akan menjaga bentuk dan fungsi jalan agar tetap optimal meskipun terkena panas terik atau beban berat secara berulang.

c. Sifat Reologi (*Viscosity*)

Sifat reologi atau viskositas aspal merupakan karakteristik penting yang menggambarkan ketahanan material terhadap aliran atau deformasi saat mendapatkan beban. Viskositas ini sangat menentukan bagaimana aspal akan berperilaku saat dipanaskan dan dicampur dengan agregat dalam proses pembuatan perkerasan jalan. Semakin tinggi nilai viskositas, berarti aspal lebih keras dan lebih tahan terhadap deformasi, terutama pada suhu tinggi dan beban lalu lintas yang berat. Namun, viskositas yang terlalu tinggi juga membuat aspal menjadi sulit untuk dicampur dan dipadatkan, sehingga memerlukan suhu pengolahan yang lebih tinggi agar tetap dapat diaplikasikan secara optimal.

3. Pengujian Aspal di Laboratorium

a. Uji Penetrasi

Mengukur kedalaman penetrasi jarum standar pada suhu tetap.

- 1) Alat: Penetrometer
- 2) Standar: SNI 06-2456-1991
- 3) Contoh: Aspal 60/70 = penetrasi 60 – 70 dmm

b. Uji Softening Point

Menentukan suhu ketika aspal mulai meleleh.

- 1) Alat: Ring and Ball
- 2) Standar: SNI 06-2434-1991

- 3) Softening point ideal: 48–56°C
- c. Uji Ductility (Kedakturan)

Mengukur seberapa jauh aspal dapat ditarik sebelum putus pada suhu 25°C.

 - 1) Ductility ideal: >100 cm
 - 2) Menunjukkan elastisitas dan fleksibilitas aspal
- d. Uji Viskositas
 - 1) Menggunakan viskometer vakum pada suhu 60°C atau 135°C
 - 2) Menentukan suhu optimal untuk pencampuran dan pemadatan
 - 3) Standar: ASTM D2171
- e. Uji *Flash Point* dan Fire Point
 - 1) *Flash Point*: suhu saat uap aspal menyala sesaat
 - 2) Fire Point: suhu saat uap terbakar secara terus menerus
 - 3) Standar: ASTM D92
- f. Uji Aging (Penuaan Aspal)
 - 1) Menggunakan RTFOT (Rolling Thin Film Oven Test) dan PAV (Pressure Aging Vessel)
 - 2) Meniru proses penuaan akibat pemanasan dan oksidasi selama aplikasi dan masa pakai

4. Spesifikasi Nasional dan Internasional

- a. Standar Nasional (SNI dan Bina Marga)
 - 1) SNI 06-2456-1991 – Penetrasi
 - 2) SNI 06-2434-1991 – Titik lembek
 - 3) Spesifikasi Umum Bina Marga (2018 Revisi 2)
- b. Standar Internasional (AASHTO dan ASTM)
 - 1) AASHTO M320 – *Performance Grade* (PG)
 - 2) ASTM D5 – *Penetration Test*
 - 3) ASTM D36 – *Softening Point*
 - 4) ASTM D4402 – *Viscosity Test*

5. Inovasi dan Tren Teknologi Aspal

- a. Aspal Berbasis Limbah (*Waste-Based Asphalt*)

Inovasi teknologi dalam dunia perkerasan jalan terus berkembang untuk meningkatkan kualitas dan keberlanjutan

material aspal. Salah satu tren terbaru adalah penggunaan aspal berbasis limbah, yang memanfaatkan bahan-bahan daur ulang seperti plastik bekas dan crumb rubber dari ban bekas. Pendekatan ini tidak hanya berkontribusi pada pengurangan limbah plastik dan ban di lingkungan, tetapi juga mampu meningkatkan performa fisik dan mekanis campuran aspal secara signifikan.

b. Aspal Ramah Lingkungan (*Green Asphalt*)

Inovasi dalam teknologi aspal saat ini juga sangat menekankan aspek keberlanjutan dan ramah lingkungan, salah satunya melalui pengembangan aspal ramah lingkungan atau *Green Asphalt*. Aspal jenis ini dirancang untuk mengurangi dampak negatif terhadap lingkungan selama proses produksi dan aplikasinya. Salah satu teknologi yang banyak digunakan adalah emulsi dingin, yaitu aspal yang dicampur dengan air dan bahan kimia tertentu sehingga dapat diaplikasikan pada suhu rendah tanpa perlu pemanasan tinggi seperti pada aspal panas konvensional. Hal ini secara signifikan mengurangi konsumsi energi dan emisi gas rumah kaca.

Bio-asphalt menjadi tren yang menjanjikan karena bahan dasarnya berasal dari sumber terbarukan seperti minyak sawit dan ekstrak tebu. Bio-asphalt ini berpotensi menggantikan aspal fosil yang selama ini menjadi bahan baku utama. Penggunaan bio-asphalt tidak hanya mengurangi ketergantungan pada sumber daya fosil, tetapi juga mengurangi emisi karbon dioksida dan polutan lain selama proses produksi. Dengan sifat yang ramah lingkungan dan kemampuannya dalam memberikan kinerja yang setara dengan aspal konvensional, bio-asphalt menjadi alternatif yang menarik untuk pembangunan infrastruktur berkelanjutan.

Warm mix asphalt (WMA) adalah inovasi lain yang juga termasuk dalam *Green Asphalt*. Teknologi WMA memungkinkan pencampuran dan pemadatan aspal pada suhu yang lebih rendah hingga 30°C dibandingkan aspal panas biasa. Pengurangan suhu ini menurunkan penggunaan energi dan emisi gas berbahaya serta meningkatkan keselamatan kerja karena lingkungan kerja menjadi lebih sejuk dan aman.

c. *Smart Asphalt*

Smart asphalt merupakan inovasi terbaru dalam teknologi perkerasan yang mengintegrasikan sensor dan sistem pemantauan canggih untuk meningkatkan kualitas dan umur jalan. Dengan memasang sensor di dalam lapisan aspal, kondisi seperti suhu, tekanan beban kendaraan, dan munculnya retakan dapat dipantau secara real-time. Informasi ini sangat penting untuk mendeteksi kerusakan dini sebelum menjadi masalah yang lebih serius dan mahal untuk diperbaiki. Teknologi ini memungkinkan pengelola jalan melakukan pemeliharaan preventif secara tepat waktu sehingga memperpanjang masa pakai jalan.

D. Semen dan Beton untuk Perkerasan Kaku

Perkerasan kaku atau rigid pavement adalah jenis struktur jalan yang menggunakan lapisan beton semen Portland (PCC: *Portland Cement Concrete*) sebagai lapisan utama yang menanggung beban lalu lintas. Beton pada perkerasan kaku memiliki kekuatan struktural yang dominan dibanding lapisan di bawahnya. Oleh karena itu, pemilihan material penyusun beton terutama semen, agregat, dan bahan tambah (*admixture*) merupakan faktor utama dalam menentukan performa, umur layanan, dan biaya perawatan jalan. Berdasarkan *AASHTO Guide for Design of Pavement Structures* (2015) dan Spesifikasi Umum Bina Marga 2018 Revisi 2, semen dan beton untuk perkerasan harus memenuhi kriteria teknis tertentu seperti kuat tekan tinggi, tahan terhadap retak susut dan lingkungan agresif, serta memiliki ketahanan terhadap beban berulang dan perubahan suhu.

1. Semen untuk Perkerasan Kaku

Semen merupakan bahan pengikat hidraulik utama dalam beton. Karakteristik utama yang dipersyaratkan:

- a. Kuat tekan minimum 28 hari ≥ 32.5 MPa
 - b. Kandungan SO_3 , C_3A , dan alkali yang terkendali
 - c. Fineness dan waktu ikat sesuai kebutuhan desain
- Standar teknis semen:
- a. SNI 2049:2015 – Semen Portland

b. ASTM C150/C595 – Spesifikasi semen untuk konstruksi beton

Pada konteks perkerasan kaku, jenis semen yang lazim digunakan adalah:

1) *Semen Portland Tipe I (OPC)*

Semen Portland Tipe I (Ordinary Portland Cement/OPC) merupakan jenis semen yang paling umum digunakan dalam konstruksi, termasuk pada perkerasan kaku seperti jalan beton. Semen ini dirancang untuk kondisi lingkungan normal tanpa paparan bahan kimia agresif atau lingkungan yang sangat basah. OPC memiliki kemampuan pengerasan yang stabil dan kuat, sehingga sangat cocok untuk struktur yang membutuhkan kekuatan tinggi dalam waktu relatif singkat. Kegunaannya meliputi pembuatan jalan, jembatan, bangunan gedung, dan struktur beton lainnya.

2) *Semen Portland Tipe II*

Semen Portland Tipe II dirancang khusus untuk memberikan ketahanan terhadap serangan sulfat ringan hingga sedang yang biasanya ditemukan di lingkungan seperti daerah rawa atau wilayah dengan air tanah yang agresif. Sulfat dapat merusak struktur beton dengan mengganggu ikatan kimia dalam semen, sehingga semen tipe ini mengandung bahan yang dapat mengurangi reaksi tersebut. Dengan demikian, penggunaan semen tipe II sangat penting untuk memastikan daya tahan perkerasan kaku pada kondisi lingkungan yang cenderung korosif dan basah.

3) *Semen Portland Tipe V*

Semen Portland Tipe V memiliki ketahanan yang sangat tinggi terhadap serangan sulfat, sehingga sangat cocok digunakan pada daerah-daerah yang memiliki kadar sulfat tinggi, seperti wilayah pesisir atau tanah dengan kandungan sulfat yang ekstrim. Kandungan bahan aktif dalam semen ini dirancang khusus untuk mengurangi reaktivitas dengan sulfat yang biasanya dapat merusak struktur beton. Oleh karena itu, semen tipe V mampu menjaga kekuatan dan keawetan perkerasan kaku di lingkungan yang sangat korosif tersebut.

4) *Semen Portland Pozzolan (PPC)*

Semen *Portland Pozzolan* (PPC) merupakan jenis semen yang mengandung bahan pozzolan, yaitu material silika atau alumina reaktif yang berfungsi meningkatkan kualitas dan daya tahan beton. Kehadiran pozzolan dalam semen ini membantu mengurangi permeabilitas beton serta meningkatkan ketahanan terhadap reaksi alkali-agregat yang dapat menyebabkan kerusakan pada struktur perkerasan kaku. Dengan demikian, PPC sangat cocok digunakan pada proyek jalan yang memerlukan keawetan ekstra dan ketahanan terhadap kondisi lingkungan yang agresif.

2. Karakteristik Beton untuk Perkerasan Kaku

a. Sifat Mekanis

- 1) Kuat Tekan (*Compressive Strength*): Beton perkerasan biasanya dirancang memiliki kuat tekan minimum 35–45 MPa pada umur 28 hari (SNI 2847:2019).
- 2) Kuat Tarik Belah (*Split Tensile Strength*): Umumnya sekitar 10% dari kuat tekan, namun sangat penting dalam mengatasi retak awal.
- 3) Modulus Elastisitas (E): Menentukan respons deformasi beton. Nilai tipikal: 20–30 GPa.

b. Sifat Durabilitas

- 1) Ketahanan terhadap sulfat dan klorida: Beton di daerah agresif harus memiliki rasio air-semen rendah ($<0,45$) dan semen tahan sulfat.
- 2) Kedap air (*Impermeability*): Rasio air-semen dan penggunaan *fly ash* atau silika fume dapat menurunkan porositas.
- 3) Ketahanan terhadap pembekuan-pencairan (*Freezing-Thawing*): Di daerah subtropis, entrained air pada beton digunakan untuk meningkatkan ketahanan.

c. Kontrol Susut dan Retak

Kontrol susut (*shrinkage*) dan retak pada beton perkerasan kaku merupakan aspek krusial untuk menjaga daya tahan dan kinerja jalan. Susut beton terjadi saat air dalam campuran menguap, menyebabkan volume beton mengecil dan menimbulkan tegangan tarik yang dapat menyebabkan retak. Selain itu, perubahan suhu yang drastis juga dapat memicu thermal cracking

akibat perbedaan ekspansi dan kontraksi beton. Retak ini jika tidak dikendalikan dapat mengurangi kekuatan struktural dan mempercepat kerusakan jalan.

3. Material Penyusun Beton

- a. Agregat (Kasar dan Halus)
 - 1) Sumber: batu pecah, pasir sungai, atau batu kali
 - 2) Kriteria: bersih, keras, tidak reaktif secara kimia
 - 3) Ukuran maksimum: biasanya 25–37,5 mm untuk beton jalan
- b. Air
 - 1) Harus bebas dari minyak, asam, basa kuat, dan garam berlebihan
 - 2) Standar air: SNI 2847:2019, ASTM C1602
- c. Bahan Tambah (*Admixture*)
 - 1) Plasticizer atau superplasticizer: meningkatkan workability
 - 2) Retarder: memperlambat waktu ikat beton
 - 3) *Fly ash*, silica fume, slag: meningkatkan durabilitas dan kedapatan beton

4. Spesifikasi Campuran Beton

- a. Proporsi Campuran Beton

Desain campuran beton harus mengacu pada metode yang telah dibakukan, seperti:

 - 1) ACI 211.1 – *Standard Practice for Selecting Proportions for Normal Concrete*
 - 2) SNI 7656:2012 – Prosedur Campuran Beton untuk Konstruksi Umum

Contoh komposisi umum beton jalan:

 - 1) Semen: 400 kg/m³
 - 2) Air: 160 kg/m³
 - 3) Agregat halus: 700 kg/m³
 - 4) Agregat kasar: 1100 kg/m³
 - 5) Water-cement ratio: 0,40
- b. *Workability*

Workability beton jalan tidak boleh terlalu encer agar tidak segregasi, namun cukup untuk dicetak dan dipadatkan secara efisien.

 - 1) Slump ideal: 25–75 mm

- 2) Pengujian: ASTM C143 (Slump Test)
- c. Curing Beton

Pengerasan beton harus dilakukan secara konsisten agar mencegah kehilangan air permukaan.

 - 1) Metode curing: penyemprotan air, penutup basah, curing compound
 - 2) Durasi minimum: 7 hari (dengan air); 3 hari (dengan curing compound)

5. Pengujian Beton

- a. Uji Kuat Tekan (*Compressive Strength Test*)
 - 1) Standar: ASTM C39 / SNI 1974:2011
 - 2) Sampel: silinder Ø15x30 cm atau kubus 15x15x15 cm
 - 3) Umur uji: 7, 14, dan 28 hari
- b. Uji Slump
 - 1) Menilai workability beton segar
 - 2) Slump 25–75 mm cocok untuk beton perkerasan
- c. Uji Modulus Elastisitas
 - 1) ASTM C469 – *Static Modulus of Elasticity*
 - 2) Mengukur respon beton terhadap beban dinamis dan berulang
- d. Uji Ketahanan Terhadap Sulfat
 - 1) ASTM C1012 – Menguji ekspansi beton dalam larutan sulfat
- e. Uji Permeabilitas
 - 1) ASTM C1202 – *Rapid Chloride Permeability Test* (RCPT)
 - 2) Menilai resistensi terhadap penetrasi klorida

6. Inovasi Material Beton Perkerasan

- a. Beton Kinerja Tinggi (*High-Performance Concrete* – HPC)

Beton Kinerja Tinggi (*High-Performance Concrete* atau HPC) merupakan inovasi material beton yang dirancang untuk memenuhi kebutuhan konstruksi dengan standar kekuatan dan daya tahan yang lebih tinggi dibandingkan beton konvensional. HPC memiliki kuat tekan lebih dari 60 MPa, yang memungkinkan struktur perkerasan seperti jalan tol dan bandara mampu menahan beban lalu lintas berat dan frekuensi penggunaan yang tinggi. Kekuatan tekan yang tinggi ini sangat

penting untuk memastikan stabilitas dan umur panjang perkerasan.

b. Beton Pracetak (*Precast Concrete Slab*)

Beton pracetak (*precast concrete slab*) merupakan inovasi penting dalam pembangunan perkerasan jalan yang menggunakan sistem modular. Beton pracetak dibuat di pabrik dengan kontrol kualitas yang ketat, kemudian dipasang di lokasi konstruksi dalam bentuk panel atau pelat beton siap pasang. Sistem ini memungkinkan penggantian bagian perkerasan secara cepat dan efisien tanpa harus melakukan pengecoran langsung di lapangan, sehingga sangat menguntungkan untuk proyek jalan tol, bandara, dan jalan dengan volume lalu lintas tinggi.

c. Beton Geopolimer

Beton geopolimer merupakan inovasi material beton yang semakin populer sebagai alternatif ramah lingkungan pengganti beton konvensional berbasis semen Portland. Beton ini menggunakan bahan-bahan seperti abu terbang (*fly ash*) atau slag sebagai pengganti semen Portland, yang biasanya menjadi penyumbang emisi karbon cukup besar dalam proses produksinya. Dengan mengandalkan reaksi kimia geopolymerisasi antara bahan-bahan tersebut dan larutan alkali, beton geopolimer mampu membentuk matriks padat dan kuat yang memiliki karakteristik mekanik setara atau bahkan lebih baik dari beton biasa.

E. Material Tambahan dan Daur Ulang

Pada konteks pembangunan infrastruktur jalan yang berkelanjutan, pemilihan material tambahan dan daur ulang menjadi aspek penting dalam mendukung efisiensi biaya, pengurangan dampak lingkungan, dan peningkatan kualitas struktur jalan. Seiring perkembangan teknologi konstruksi dan meningkatnya kesadaran terhadap lingkungan, berbagai material alternatif seperti geotekstil, *Reclaimed Asphalt Pavement* (RAP), *fly ash*, *slag*, dan material daur ulang lainnya semakin banyak digunakan pada konstruksi jalan, baik sebagai bagian dari struktur perkerasan maupun untuk peningkatan kualitas tanah dasar. Penggunaan material tambahan dan daur ulang telah diatur dan didukung oleh berbagai standar nasional dan internasional

seperti Spesifikasi Umum Bina Marga, ASTM, dan AASHTO, serta telah terbukti secara teknis mampu meningkatkan performa perkerasan jalan dengan tetap menjaga aspek keberlanjutan.

1. Geotekstil

Geotekstil adalah material sintetis (biasanya dari polipropilena atau poliester) yang digunakan dalam aplikasi teknik sipil dan geoteknik. Dalam konstruksi jalan, *Geotekstil* berfungsi untuk:

- a. Separasi antara tanah dasar dan lapis pondasi agregat
- b. Filtrasi air dari tanah tanpa membawa partikel halus
- c. Drainase lateral dan vertikal
- d. Reinforcement pada tanah lunak untuk meningkatkan kapasitas daya dukung

Standar dan spesifikasi:

- a. ASTM D5262, ASTM D4491 – Pengujian kekuatan tarik dan permeabilitas

1) *Geotekstil Woven* (Tenunan)

Geotekstil woven atau tenunan adalah jenis *Geotekstil* yang dibuat dengan cara menenun serat-serat sintetis secara silang sehingga membentuk kain yang kuat dan tahan lama. Proses tenunan ini menghasilkan produk dengan kekuatan tarik yang tinggi, menjadikannya sangat efektif untuk aplikasi teknik sipil yang membutuhkan penguatan struktur tanah atau material lain. Kekuatan tarik yang superior membuat *Geotekstil woven* mampu menahan beban berat dan tekanan yang muncul di lapisan tanah, sehingga membantu meningkatkan stabilitas dan daya dukung tanah dasar pada proyek konstruksi.

2) *Geotekstil non-Woven* (Non-Tenunan)

Geotekstil non-woven atau non-tenunan adalah jenis *Geotekstil* yang dibuat dengan cara mengikat serat-serat sintetis secara acak menggunakan metode mekanis, kimia, atau termal tanpa proses tenunan. Struktur non-woven ini menghasilkan kain yang memiliki pori-pori lebih besar dan distribusi serat yang tidak beraturan, sehingga memiliki kemampuan filtrasi dan drainase yang sangat baik. Karena sifat ini, *Geotekstil non-woven* lebih banyak digunakan pada aplikasi yang memerlukan pengelolaan air dan pengendalian

aliran air dalam tanah, seperti pada sistem drainase dan pengendalian erosi.

3) Geokomposit

Geokomposit merupakan material yang menggabungkan dua atau lebih jenis produk geosintetik, biasanya berupa kombinasi *Geotekstil* dan geonet, untuk menghasilkan fungsi yang multifungsi dan lebih optimal dalam aplikasi teknik sipil. *Geotekstil* pada geokomposit berfungsi sebagai lapisan filtrasi atau pemisah yang mencegah masuknya partikel tanah ke dalam lapisan drainase, sementara geonet berperan sebagai media pengaliran air yang memiliki daya tampung dan aliran lebih baik dibandingkan *Geotekstil* saja. Kombinasi ini memberikan keunggulan dalam pengelolaan air dan stabilisasi tanah yang tidak dapat dicapai oleh masing-masing bahan secara terpisah.

2. *Reclaimed Asphalt Pavement (RAP)*

RAP adalah material aspal daur ulang yang diperoleh dari hasil pengupasan perkerasan jalan lama. Material ini kemudian dihancurkan dan diolah kembali sebagai bahan campuran perkerasan baru (*hot mix* atau *cold mix*). Manfaat penggunaan RAP:

- a. Ekonomis: Mengurangi kebutuhan aspal dan agregat baru.
- b. Lingkungan: Mengurangi volume limbah konstruksi.
- c. Teknis: Memiliki sifat yang masih dapat dimanfaatkan, terutama agregat keras dan residu aspal.

Standar dan regulasi:

- a. AASHTO M323-20 – *Volumetric Mix Design of Asphalt Mixtures*
- b. Bina Marga 2018 – Penggunaan RAP dalam campuran AC-WC dan AC-BC hingga 30% untuk jalan nasional

Proses pengolahan RAP dimulai dengan pemisahan dan penghancuran material aspal yang diambil dari permukaan jalan. Penghancuran dilakukan untuk mendapatkan ukuran agregat yang seragam dan sesuai dengan spesifikasi yang dibutuhkan dalam campuran aspal baru. Tahap ini sangat penting untuk memastikan RAP dapat dicampur dengan baik bersama bahan baru tanpa menurunkan kualitas campuran akhir.

Setelah penghancuran, dilakukan pengujian kadar aspal residu dalam RAP serta distribusi ukuran agregatnya. Kadar aspal residu menjadi parameter penting untuk menentukan kebutuhan aspal baru dalam campuran, agar campuran akhir memiliki performa yang sesuai standar. Pengujian ukuran agregat juga memastikan bahwa RAP memenuhi syarat distribusi butir yang diinginkan sehingga tidak terjadi segregasi dan campuran menjadi homogen. Proses pengujian ini harus dilakukan secara teliti dan rutin untuk menjaga konsistensi kualitas RAP. Setelah pengujian, RAP dicampur dengan aspal baru dan bahan tambahan seperti rejuvenator. Rejuvenator berfungsi untuk memperbaiki sifat aspal residu yang sudah menurun kualitasnya akibat penuaan, sehingga campuran akhir memiliki elastisitas dan daya tahan yang optimal. Pencampuran yang tepat antara RAP, aspal baru, dan bahan tambahan sangat menentukan keberhasilan penggunaan RAP dalam perkerasan jalan.

3. *Fly Ash*

Fly ash adalah sisa hasil pembakaran batu bara yang berbentuk serbuk halus. Dalam konstruksi jalan, *fly ash* digunakan sebagai bahan substitusi parsial semen dalam campuran beton dan untuk stabilisasi tanah dasar. Manfaat *fly ash*:

- a. Meningkatkan *workability* dan kedapannya beton
- b. Mengurangi panas hidrasi
- c. Meningkatkan durabilitas terhadap sulfat dan klorida
- d. Mengurangi biaya dan emisi karbon

Standar teknis:

- a. ASTM C618 – *Standard Specification for Coal Fly Ash*
- b. SNI 3751:2008 – Bahan tambah pozzolan aktif

Salah satu aplikasi utama *fly ash* dalam teknik sipil adalah sebagai bahan campuran bersama kapur atau semen untuk memperbaiki karakteristik tanah dasar yang ekspansif atau lemah. Ketika dicampur dengan bahan pengikat tersebut, *fly ash* bereaksi secara kimiawi membentuk senyawa yang meningkatkan kekuatan dan kestabilan tanah, serta mengurangi plastisitas dan potensi penyusutan atau pengembangan tanah.

4. Slag (*Granulated Blast Furnace Slag* - GBFS)

Slag, khususnya *Granulated Blast Furnace Slag* (GBFS), adalah produk samping dari proses produksi baja yang kini semakin banyak dimanfaatkan dalam bidang konstruksi sebagai bahan pengganti sebagian semen pada campuran beton maupun sebagai bahan pengikat dalam stabilisasi tanah. GBFS memiliki sifat puzolanik yang memungkinkan reaksi kimia dengan kalsium hidroksida dari semen Portland, membentuk senyawa hidrasi yang memperkuat struktur beton atau tanah. Pemanfaatan slag ini tidak hanya membantu mengurangi penggunaan semen, tetapi juga mengoptimalkan limbah industri sehingga lebih ramah lingkungan.

Salah satu keunggulan utama penggunaan GBFS adalah tingkat hidrasi yang relatif lambat, sehingga beton atau tanah yang menggunakan slag memiliki waktu pengerasan yang lebih panjang dan menghasilkan kekuatan yang lebih stabil dalam jangka panjang. Selain itu, slag memiliki ketahanan tinggi terhadap serangan sulfat, yang membuatnya sangat cocok digunakan pada kondisi lingkungan agresif seperti daerah dengan tanah sulfat tinggi atau air tanah yang korosif. Ketahanan ini sangat penting untuk memastikan umur layanan struktur bangunan atau jalan yang menggunakan material campuran slag tetap optimal.

5. Pozzolan Alam (Abu Vulkanik, Zeolit)

Pozzolan alam, seperti abu vulkanik dan zeolit, merupakan bahan alami yang memiliki sifat pozzolanik, artinya dapat bereaksi dengan kalsium hidroksida hasil hidrasi semen untuk membentuk senyawa pengikat tambahan yang memperkuat struktur beton. Penggunaan pozzolan alam sebagai pengganti parsial semen dalam campuran beton menjadi alternatif yang efektif untuk meningkatkan kualitas beton sekaligus mengurangi penggunaan semen Portland, yang berdampak pada penurunan emisi karbon dalam proses konstruksi. Selain itu, pozzolan alam membantu menurunkan panas hidrasi yang dihasilkan selama proses pengerasan beton sehingga mengurangi risiko retak akibat perubahan suhu.

Abu vulkanik merupakan salah satu contoh pozzolan alam yang umum digunakan karena kandungan silika dan alumina yang tinggi. Ketika dicampurkan dengan semen, abu vulkanik memperbaiki sifat fisik dan kimia beton, meningkatkan ketahanan terhadap serangan kimiawi seperti sulfat, yang sering ditemukan di lingkungan agresif seperti tanah

rawa atau daerah pesisir. Zeolit, mineral berpori yang juga memiliki sifat pozzolanik, mampu memperbaiki daya tahan beton dengan meningkatkan densitas matriks beton dan mengurangi permeabilitas. Hal ini membuat beton lebih tahan lama dan lebih stabil terhadap degradasi lingkungan.

6. Rejuvenator

Rejuvenator adalah bahan kimia khusus yang digunakan dalam proses pencampuran *Reclaimed Asphalt Pavement* (RAP) untuk memulihkan sifat aspal tua yang telah mengalami pengerasan dan kehilangan fleksibilitas. Seiring waktu dan paparan lingkungan, aspal dalam campuran RAP cenderung menjadi kaku dan rapuh, sehingga perlu direvitalisasi agar dapat berfungsi optimal kembali. Rejuvenator bekerja dengan cara menembus lapisan aspal lama dan memperbaiki viskositas serta elastisitasnya, sehingga campuran aspal hasil pencampuran tetap memiliki performa yang baik seperti aspal baru.

Komponen umum dalam rejuvenator meliputi minyak nabati, ester, dan bio-asphalt yang bersifat ramah lingkungan dan dapat memberikan efek plastisitas pada aspal tua. Minyak nabati, misalnya, berasal dari bahan alami seperti minyak jarak atau minyak biji kapas, yang mampu melembutkan aspal tua tanpa merusak struktur kimianya. Ester juga digunakan karena kemampuannya dalam meningkatkan fleksibilitas campuran aspal. Bio-asphalt, yang merupakan produk turunan biomassa, juga menjadi pilihan modern karena selain efektif, juga mendukung prinsip pembangunan berkelanjutan dengan mengurangi penggunaan bahan berbasis fosil.

7. Serat Tambahan (*Fiber Reinforcement*)

Serat tambahan atau *Fiber Reinforcement* merupakan material yang digunakan dalam campuran beton atau aspal untuk meningkatkan kekuatan tarik serta mengontrol munculnya retak pada struktur perkerasan. Penambahan serat ini bertujuan untuk memperbaiki sifat mekanis material dengan cara mendistribusikan beban lebih merata dan menahan pertumbuhan retak yang terjadi akibat tekanan atau perubahan suhu. Dengan demikian, serat tambahan dapat meningkatkan daya tahan dan umur pakai perkerasan, sekaligus mengurangi kebutuhan perbaikan dan pemeliharaan yang seringkali memakan biaya besar.

Terdapat berbagai jenis serat yang digunakan sebagai bahan tambahan dalam konstruksi perkerasan, antara lain serat baja, serat polipropilena, dan serat selulosa. Serat baja dikenal memiliki kekuatan tarik tinggi dan daya tahan yang kuat terhadap suhu tinggi, sehingga cocok digunakan pada beton perkerasan yang menerima beban berat dan kondisi ekstrem. Serat polipropilena, yang merupakan serat sintesis, memiliki sifat tahan terhadap korosi dan dapat membantu mengontrol retak mikro pada beton maupun aspal. Sedangkan serat selulosa, yang berasal dari bahan alami, digunakan untuk meningkatkan kemampuan kontrol retak serta menambah kelenturan campuran, sekaligus ramah lingkungan.

8. Limbah Plastik dan Karet

Limbah plastik dan karet mulai banyak digunakan dalam industri konstruksi perkerasan sebagai bahan substitusi agregat atau modifikasi aspal. Pemanfaatan limbah ini tidak hanya bertujuan untuk mengurangi dampak lingkungan dari sampah plastik dan karet bekas, tetapi juga untuk meningkatkan performa teknis perkerasan. Plastik dan karet yang diolah dan dicampur dalam campuran aspal atau agregat memberikan kontribusi pada peningkatan ketahanan terhadap deformasi permanen seperti rutting, yaitu penyok yang terjadi pada permukaan jalan akibat beban lalu lintas yang berulang. Dengan demikian, jalan yang menggunakan bahan ini dapat bertahan lebih lama dalam kondisi lalu lintas padat dan beban berat.

Penggunaan limbah plastik dan karet juga membantu menjaga stabilitas campuran aspal pada suhu tinggi. Suhu tinggi yang sering terjadi terutama di daerah tropis dapat menyebabkan aspal menjadi lunak dan mudah rusak. Penambahan bahan limbah ini membuat campuran aspal menjadi lebih elastis dan tahan terhadap perubahan suhu ekstrem. Karet, khususnya crumb rubber dari ban bekas, memiliki sifat elastis yang dapat mengurangi retak dan kerusakan akibat siklus pemuaian dan penyusutan. Sementara plastik dapat meningkatkan kohesi campuran sehingga lapisan perkerasan lebih stabil dan kuat.



BAB IV

PERENCANAAN STRUKTUR PERKERASAN JALAN

Perencanaan struktur perkerasan jalan merupakan tahap krusial dalam pembangunan infrastruktur transportasi yang bertujuan untuk merancang lapisan-lapisan jalan agar mampu menahan beban lalu lintas dan kondisi lingkungan selama masa pelayanan yang direncanakan. Proses perencanaan ini melibatkan analisis mendalam terhadap karakteristik lalu lintas, kondisi tanah dasar (*Subgrade*), serta pemilihan material yang tepat untuk setiap lapisan perkerasan. Dengan perencanaan yang matang, diharapkan jalan dapat berfungsi optimal, memiliki umur pakai yang panjang, dan biaya pemeliharaan yang efisien.

Untuk merancang struktur perkerasan, metode desain seperti CBR (*California Bearing Ratio*), AASHTO (*American Association of State Highway and Transportation Officials*), dan standar nasional seperti Bina Marga menjadi acuan utama. Metode-metode tersebut memperhitungkan berbagai faktor teknis, termasuk beban kendaraan, kualitas tanah dasar, dan ketebalan lapisan perkerasan yang dibutuhkan. Pendekatan ini memastikan bahwa perkerasan yang dibangun dapat menyesuaikan dengan kondisi aktual lapangan dan kebutuhan lalu lintas di wilayah tersebut.

A. Analisis Lalu Lintas dan Beban Kendaraan

Perencanaan struktur perkerasan jalan merupakan tahapan penting dalam desain jalan raya yang bertujuan untuk menjamin umur layanan yang optimal, kenyamanan berkendara, serta efisiensi biaya konstruksi dan pemeliharaan. Salah satu komponen kunci dalam perencanaan ini adalah analisis lalu lintas dan beban kendaraan, karena struktur jalan harus dirancang untuk mampu menahan beban berulang dari kendaraan yang melintas sepanjang umur rencana jalan. Tanpa

analisis lalu lintas dan beban kendaraan yang akurat, perkerasan jalan berisiko mengalami kegagalan dini seperti retak, deformasi, dan kerusakan struktural lainnya.

1. Analisis Lalu Lintas dalam Perkerasan Jalan

Analisis lalu lintas adalah proses identifikasi dan proyeksi volume kendaraan yang akan melintasi suatu ruas jalan selama umur layanannya. Analisis ini melibatkan pengumpulan data lalu lintas eksisting, klasifikasi kendaraan, proyeksi pertumbuhan lalu lintas, dan distribusi arah lalu lintas. Menurut AASHTO (2018), variabel lalu lintas yang perlu dianalisis untuk desain perkerasan meliputi:

- a. Volume lalu lintas harian (*Average Daily Traffic*, ADT)
- b. Volume lalu lintas tahunan rata-rata (*Annual Average Daily Traffic*, AADT)
- c. Komposisi kendaraan berat dan ringan
- d. Pertumbuhan lalu lintas tahunan (%)
- e. Jumlah jalur dan arah lalu lintas
- f. Distribusi harian dan musiman lalu lintas
- g. Jumlah sumbu kendaraan dan tipe distribusi beban

Desain perkerasan modern mensyaratkan estimasi beban lalu lintas kumulatif selama umur rencana jalan yang dinyatakan dalam satuan sumbu setara standar 8.16 ton atau *Equivalent Single Axle Load* (ESAL).

2. Metode Perhitungan Beban Lalu Lintas

- a. *Equivalent Single Axle Load* (ESAL)

ESAL adalah metode konversi beban kendaraan berat dengan berbagai konfigurasi sumbu dan bobot menjadi satuan ekuivalen terhadap beban standar 18.000 pon (8,16 ton) sumbu tunggal roda ganda. Rumus dasar:

$$ESAL = \sum (\text{jumlah kendaraan} \times \text{faktor ekuivalensi masing-masing kendaraan})$$

Faktor ekuivalensi ditentukan oleh:

- 1) Beban sumbu
 - 2) Jenis perkerasan
 - 3) Kondisi perkerasan awal
 - 4) Jumlah lapisan dan ketebalan
- b. Metode *Axle Load Spectra* (ALS)

Metode *Axle Load Spectra* (ALS) merupakan pendekatan yang lebih mutakhir dan canggih dalam perhitungan beban lalu lintas untuk desain perkerasan jalan. Berbeda dengan metode tradisional *Equivalent Single Axle Load* (ESAL) yang hanya menggunakan beban sumbu tunggal standar, ALS mengandalkan data beban sumbu aktual yang diperoleh dari sistem *Weigh-In-Motion* (WIM). Data ini mencakup variasi beban sumbu yang sebenarnya melewati jalan, termasuk distribusi frekuensi dan intensitas beban pada berbagai jenis kendaraan. Dengan demikian, ALS mampu memberikan gambaran yang lebih realistis mengenai kondisi beban yang diterima oleh struktur perkerasan.

3. Sumber Data dan Alat Pengumpulan

- a. Survei Lalu Lintas
 - 1) *Manual Traffic Count* (MTC)
 - 2) *Automatic Traffic Recorder* (ATR)
 - 3) *Weigh-In-Motion (WIM) systems* – merekam beban sumbu aktual kendaraan secara dinamis
- b. Klasifikasi Kendaraan
 Klasifikasi kendaraan biasanya mengikuti standar Manual Kapasitas Jalan Indonesia (MKJI) atau klasifikasi menurut AASHTO dan Bina Marga. Contoh kategori kendaraan:
 - 1) Kendaraan ringan (mobil penumpang)
 - 2) Truk ringan (truk 2 sumbu)
 - 3) Truk sedang (truk 3–4 sumbu)
 - 4) Truk berat (truk 5 sumbu atau lebih)

4. Proyeksi Lalu Lintas

- a. Pertumbuhan Tahunan Lalu Lintas
 Umur rencana jalan umumnya 10–20 tahun, sehingga proyeksi pertumbuhan lalu lintas menjadi penting. Perkiraan pertumbuhan tahunan lalu lintas (% g) digunakan untuk menghitung beban lalu lintas kumulatif. Rumus umum:

$$AADT_n = AADT_0 \times (1 + g)^n$$

Dimana:

- 1) $AADT_n$ = lalu lintas tahun ke-n
- 2) $AADT_0$ = lalu lintas awal

- 3) g = laju pertumbuhan
- 4) n = umur rencana

b. Perhitungan Cumulative ESAL

$$\text{Cumulative ESAL} = \text{AADT} \times \% \text{ kendaraan berat} \times \text{Faktor} \\ \text{ESAL} \times \text{DF} \times 365 \times n$$

Dimana:

- 1) DF = Directional Distribution Factor

5. Beban Kendaraan dan Dampaknya terhadap Perkerasan

Beban kendaraan memiliki pengaruh yang sangat signifikan terhadap kondisi dan umur perkerasan jalan. Ketika kendaraan melintas, tekanan vertikal yang ditransmisikan oleh roda kendaraan diteruskan ke lapisan bawah perkerasan. Tekanan ini menyebabkan berbagai jenis kerusakan pada struktur perkerasan, termasuk deformasi permanen yang terjadi akibat tekanan berulang sehingga permukaan jalan menjadi tidak rata. Selain itu, beban kendaraan juga menyebabkan terjadinya fatigue cracking, yaitu retak-retak pada lapisan perkerasan yang muncul karena pengulangan beban yang terus-menerus dalam jangka waktu tertentu.

Salah satu kerusakan khas yang sering terjadi akibat beban kendaraan adalah rutting, yaitu terbentuknya alur roda yang dalam pada permukaan jalan. Rutting terjadi karena lapisan perkerasan yang berada di bawah permukaan tidak mampu menahan deformasi plastis akibat tekanan berulang dari roda kendaraan berat. Selain itu, beban kendaraan juga dapat menyebabkan fenomena pumping, yaitu keluarnya air dan partikel tanah dari lapisan bawah perkerasan ke permukaan akibat tekanan berulang yang mengakibatkan hilangnya kekuatan dan stabilitas struktur jalan.

6. Standar dan Pedoman Terkait

- a. *AASHTO Guide for Design of Pavement Structures* (2018)
- b. Manual Desain Perkerasan Jalan – Direktorat Bina Teknik Jalan dan Jembatan
- c. MKJI 1997 – Metode pengukuran volume dan kapasitas lalu lintas jalan

7. Studi Kasus Singkat

a. Proyek Jalan Tol Trans Jawa

Proyek Jalan Tol Trans Jawa merupakan salah satu proyek infrastruktur terbesar di Indonesia yang melibatkan pembangunan jaringan jalan tol dari ujung barat hingga timur Pulau Jawa. Dalam proyek ini, pengumpulan data beban lalu lintas menjadi faktor penting untuk memastikan ketahanan struktur perkerasan terhadap lalu lintas berat yang intensif. Untuk itu, digunakan teknologi *Weigh-In-Motion* (WIM) untuk mengukur beban sumbu kendaraan secara langsung dan dinamis saat melaju. Data yang diperoleh dari WIM kemudian dianalisis menggunakan metode *Axle Load Spectra* (ALS), yang memungkinkan pemodelan distribusi beban aktual berdasarkan tipe kendaraan dan jumlah sumbu.

Penerapan metode ALS dalam proyek ini menunjukkan hasil yang lebih akurat dibanding metode tradisional seperti *Equivalent Single Axle Load* (ESAL). Dari data yang dikumpulkan, diketahui bahwa beban desain aktual yang ditanggung oleh perkerasan ternyata 20% lebih tinggi dari estimasi yang didasarkan pada metode ESAL konvensional. Temuan ini sangat penting karena jika hanya menggunakan pendekatan ESAL, desain perkerasan berpotensi tidak cukup kuat untuk menahan beban aktual, yang dalam jangka panjang akan menyebabkan kerusakan dini dan biaya pemeliharaan yang lebih tinggi.

b. Jalan Nasional di Sumatera

Pada pembangunan dan perencanaan Jalan Nasional di Sumatera, metode perhitungan beban lalu lintas jangka panjang menjadi dasar penting dalam penentuan ketebalan struktur perkerasan. Proyek ini menggunakan pendekatan *Equivalent Single Axle Load* (ESAL) untuk memproyeksikan beban lalu lintas selama 20 tahun masa layanan jalan. Dengan mempertimbangkan data historis lalu lintas dan tren pertumbuhan kendaraan, dilakukan perhitungan kumulatif ESAL untuk mengestimasi total beban sumbu yang akan ditanggung oleh perkerasan selama periode desain tersebut.

Berdasarkan perhitungan ESAL dan panduan dari AASHTO Pavement Design Guide (2018), diperoleh rekomendasi

ketebalan perkerasan lentur sebagai berikut: 20 cm untuk lapisan dasar (base), 10 cm untuk lapisan subbase, dan 7 cm untuk lapisan permukaan aus yang terdiri dari *Hot Mix Asphalt* (HMA). Ketebalan ini dirancang untuk menjamin daya dukung struktural yang memadai terhadap beban lalu lintas berat di ruas jalan nasional tersebut. Penggunaan metode AASHTO memungkinkan penyesuaian desain berdasarkan nilai *reliability*, modulus elastisitas material, dan kualitas tanah dasar (*Subgrade*).

B. Karakteristik *Subgrade* dan CBR

Pada desain struktur perkerasan jalan, tanah dasar (*Subgrade*) merupakan komponen paling bawah dari sistem perkerasan yang berfungsi sebagai fondasi utama. Kekuatan dan stabilitas *Subgrade* sangat mempengaruhi kinerja jangka panjang perkerasan jalan. Oleh karena itu, penilaian karakteristik *Subgrade*, terutama melalui pengujian *California Bearing Ratio* (CBR), menjadi bagian integral dari proses desain perkerasan jalan. Karakteristik *Subgrade* menentukan ketebalan lapisan perkerasan yang diperlukan untuk mendistribusikan beban lalu lintas secara aman dan efisien. Jika *Subgrade* memiliki daya dukung rendah, maka diperlukan lapisan perkerasan yang lebih tebal untuk menghindari kerusakan dini seperti retak, rutting, dan deformasi permanen.

1. *Subgrade*

Subgrade adalah lapisan tanah asli atau tanah hasil galian/pengurugan yang berada langsung di bawah lapisan perkerasan jalan. Kinerja *Subgrade* sangat dipengaruhi oleh:

- a. Jenis tanah (lempung, lanau, pasir, kerikil)
- b. Kadar air alami
- c. Kepadatan tanah
- d. Plastisitas dan permeabilitas
- e. Daya dukung terhadap beban dinamis dan statis

Menurut Manual Desain Perkerasan Jalan (Direktorat Jenderal Bina Marga, 2024), tanah dasar ideal harus memiliki:

- a. Kepadatan $\geq 95\%$ dari Modified Proctor
- b. Nilai CBR $\geq 6\%$ (untuk perkerasan lentur), tergantung volume lalu lintas

Karakteristik *Subgrade* penting yang memengaruhi desain perkerasan:

1) Modulus Elastisitas (E)

Modulus elastisitas (E) pada lapisan tanah dasar (*Subgrade*) merupakan parameter penting dalam perencanaan struktur perkerasan jalan. Nilai E mencerminkan seberapa besar ketahanan tanah terhadap deformasi elastis ketika menerima beban lalu lintas. Semakin tinggi nilai modulus elastisitas, semakin baik kemampuan tanah dalam mendistribusikan beban dan menahan deformasi permanen. Nilai E yang umum untuk *Subgrade* bervariasi antara 20 hingga 100 MPa, tergantung pada jenis tanah dan kondisi kelembapannya.

2) Kekuatan Geser Tanah (*Shear Strength*)

Kekuatan geser tanah (*shear strength*) merupakan salah satu parameter kunci dalam menilai stabilitas *Subgrade* atau tanah dasar untuk konstruksi perkerasan jalan. Kekuatan ini menunjukkan kemampuan tanah dalam menahan gaya-gaya geser yang timbul akibat beban lalu lintas. Parameter ini ditentukan melalui pengujian seperti *triaxial test* atau *direct shear test*, yang memberikan informasi tentang kohesi tanah (c) dan sudut geser dalam (ϕ). Semakin besar nilai kekuatan geser, semakin kecil kemungkinan terjadi keruntuhan atau deformasi geser pada lapisan tanah dasar.

3) *Swelling Potential*

Swelling Potential atau potensi mengembang adalah kemampuan tanah, khususnya tanah lempung aktif seperti montmorillonit, untuk menyerap air dan mengalami peningkatan volume. Fenomena ini sangat krusial dalam perencanaan *Subgrade* karena perubahan volume tanah akibat kelembaban dapat menyebabkan pengangkatan (*heaving*) atau retak pada lapisan perkerasan jalan. Tanah yang memiliki nilai *plasticity index* (PI) tinggi umumnya menunjukkan *swelling potential* yang signifikan, sehingga perlu dikendalikan sebelum digunakan sebagai fondasi jalan.

4) Deformasi Plastis

Deformasi plastis pada lapisan tanah dasar (*Subgrade*) merupakan salah satu permasalahan utama yang sering

dijumpai dalam konstruksi jalan, terutama pada tanah yang jenuh air. Kondisi jenuh air menyebabkan tanah kehilangan kekuatan gesernya, sehingga saat menerima beban berulang dari lalu lintas kendaraan, partikel tanah mengalami pergeseran permanen. Akumulasi deformasi ini dapat mengakibatkan penurunan permukaan jalan (*rutting*), retak, bahkan kerusakan struktural yang signifikan jika tidak segera ditangani. Fenomena deformasi plastis ini biasanya lebih dominan pada jenis tanah lempung plastis tinggi dan tanah organik yang memiliki kapasitas dukung rendah.

5) Konsistensi dan Indeks Plastisitas (PI)

Konsistensi tanah dan indeks plastisitas (*Plasticity Index/PI*) merupakan parameter penting dalam menilai kinerja tanah sebagai *Subgrade*. Indeks plastisitas menunjukkan rentang kelembaban di mana tanah berada dalam kondisi plastis, yaitu antara batas cair (*liquid limit*) dan batas plastis (*plastic limit*). Semakin tinggi nilai PI, semakin besar potensi perubahan volume tanah akibat variasi kadar air. Tanah dengan PI tinggi, terutama lempung aktif seperti montmorillonit, menunjukkan perilaku ekspansif yang signifikan ketika basah, dan mengalami penyusutan saat mengering. Hal ini menyebabkan potensi retak dan ketidakstabilan lapisan perkerasan di atasnya.

2. Pengujian CBR

CBR (*California Bearing Ratio*) adalah metode pengujian untuk menilai daya dukung tanah terhadap penetrasi beban. Nilai CBR digunakan untuk menentukan tebal lapisan perkerasan yang dibutuhkan agar tidak terjadi kegagalan struktur akibat pembebanan. CBR digunakan dalam berbagai standar desain, antara lain:

- a. AASHTO *Pavement Design Guide*
- b. Bina Marga Manual Desain Jalan
- c. SNI 1744:2012 – Tata cara perencanaan tebal perkerasan lentur

1) Metode CBR Laboratorium

Mengikuti SNI 1744:2012 atau ASTM D1883, langkah-langkah meliputi:

- a) Sampel tanah dikondisikan sesuai kadar air optimum
- b) Dipadatkan dalam tiga lapisan dengan Modified Proctor

- c) Direndam (soaked) selama 96 jam (jika diperlukan)
 - d) Uji penetrasi dengan piston berdiameter 50 mm pada kecepatan 1.25 mm/menit
 - e) Hasil berupa grafik hubungan tekanan vs penetrasi
- Nilai CBR dihitung pada kedalaman 2.5 mm dan 5.0 mm:
- $$\text{CBR (\%)} = (\text{Beban uji} / \text{Beban standar}) \times 100$$
- Jika hasil 2.5 mm > 5.0 mm, gunakan nilai 2.5 mm sebagai CBR; jika sebaliknya, gunakan nilai 5.0 mm.

2) CBR Lapangan

Pengujian CBR (*California Bearing Ratio*) lapangan merupakan metode penting untuk mengevaluasi daya dukung aktual tanah *Subgrade* di lokasi konstruksi. Tidak seperti CBR laboratorium yang dilakukan pada sampel tanah yang dipersiapkan dalam kondisi tertentu, CBR lapangan mencerminkan kondisi nyata tanah di lapangan, termasuk tingkat pemadatan, kelembaban, dan variasi struktur tanah. Oleh karena itu, nilai yang diperoleh lebih representatif dan menjadi dasar penting dalam perencanaan tebal lapisan perkerasan jalan. Pengujian ini umumnya dilakukan dengan menggunakan alat CBR lapangan yang terdiri dari plat penekan, beban tetap, dan dial gauge untuk mengukur penetrasi.

Proses pengujian diawali dengan persiapan lokasi uji, di mana permukaan tanah diratakan dan diratakan secara hati-hati. Kemudian, pelat beban ditempatkan pada permukaan dan diberi beban bertahap sambil mencatat kedalaman penetrasi pada interval tertentu, biasanya 2,5 mm dan 5,0 mm. Nilai CBR dihitung dari rasio antara tekanan yang diperlukan untuk menghasilkan penetrasi tersebut terhadap tekanan standar yang diperoleh dari uji laboratorium pada batu pecah. Nilai CBR lapangan umumnya digunakan langsung dalam desain tebal perkerasan, terutama untuk menentukan ketebalan lapisan base dan subbase.

3. Klasifikasi *Subgrade* Berdasarkan CBR

Nilai CBR (%)	Klasifikasi <i>Subgrade</i>	Karakteristik
< 3%	Sangat buruk	Lempung organik, sangat lunak
3 – 6%	Buruk	Lempung plastis, jenuh air
6 – 10%	Sedang	Lempung lanauan
10 – 20%	Baik	Pasir lempungan, kerikil halus
> 20%	Sangat baik	Kerikil, tanah berbatu

4. Pengaruh Nilai CBR terhadap Desain Struktur Perkerasan

Semakin rendah nilai CBR tanah, semakin tebal lapisan base dan sub-base yang dibutuhkan. Contoh:

- CBR < 5% → memerlukan lapisan sub-base setebal > 30 cm
- CBR 10% → cukup 20 cm sub-base
- CBR 20% → dapat digunakan sebagai *Subgrade* langsung

Perhitungan ketebalan lapisan perkerasan berdasarkan CBR umumnya mengikuti nomogram atau formula pada Bina Marga 2020 dan AASHTO 2018.

5. Perbaikan *Subgrade* dengan Nilai CBR Rendah

- Stabilisasi Mekanik

Stabilisasi mekanik merupakan metode perbaikan *Subgrade* dengan nilai CBR rendah melalui pencampuran tanah asli dengan material granular seperti pasir, kerikil, atau batu pecah. Tujuan utama dari teknik ini adalah untuk meningkatkan sifat mekanis tanah, terutama kekuatan geser, kepadatan, dan daya dukungnya. Tanah dengan nilai CBR rendah, terutama jenis tanah lempung lunak atau berlumpur, memiliki kemampuan yang buruk dalam menahan beban lalu lintas. Oleh karena itu, penambahan agregat kasar dapat memperbaiki struktur butiran tanah sehingga menghasilkan campuran yang lebih stabil dan kaku.

- Stabilisasi Kimia

Stabilisasi kimia adalah metode perbaikan *Subgrade* dengan nilai CBR rendah yang dilakukan dengan menambahkan bahan kimia

seperti kapur, semen, atau *fly ash* ke dalam tanah untuk meningkatkan kekuatan dan kestabilannya. Proses ini melibatkan reaksi kimia antara bahan stabilizer dengan komponen tanah yang menghasilkan perubahan sifat fisik dan mekanik tanah. Dengan stabilisasi kimia, tanah yang awalnya lunak dan plastis dapat berubah menjadi material yang lebih keras, tahan lama, dan mampu menahan beban lalu lintas yang lebih berat.

c. Geosintetik (Geotekstil, Geogrid)

Geosintetik, seperti *Geotekstil* dan geogrid, telah menjadi solusi inovatif dalam perbaikan *Subgrade* dengan nilai CBR rendah. Material ini digunakan sebagai lapisan pemisah (*separator*) atau perkuatan (*reinforcement*) untuk meningkatkan kestabilan dan kemampuan tanah dalam menahan beban lalu lintas. Geosintetik berfungsi untuk mencegah pencampuran material lapisan perkerasan dengan tanah dasar yang lunak serta mendistribusikan tekanan secara merata ke area yang lebih luas, sehingga mengurangi deformasi dan penurunan permukaan jalan.

6. Studi Kasus dan Aplikasi

Proyek Jalan Tol Jakarta – Cikampek II menghadapi tantangan terkait kualitas *Subgrade* di beberapa lokasi yang menunjukkan nilai CBR kurang dari 6%. Nilai CBR yang rendah ini mengindikasikan bahwa tanah dasar memiliki daya dukung yang kurang memadai untuk menahan beban lalu lintas berat yang tinggi pada jalan tol. Untuk mendapatkan data yang akurat, dilakukan pengujian CBR secara menyeluruh baik di lapangan maupun di laboratorium. Pengujian ini menjadi dasar dalam menentukan metode perbaikan yang tepat untuk meningkatkan performa *Subgrade*.

Pada lokasi-lokasi dengan nilai CBR di bawah 6%, tindakan perbaikan dilakukan dengan penggalian tanah *Subgrade* yang lemah dan pengurugan kembali menggunakan tanah granular berkualitas lebih baik. Tanah granular ini dipilih karena memiliki karakteristik yang lebih stabil dan kuat untuk menopang beban. Selain itu, campuran semen sebanyak 5% ditambahkan pada material urugan sebagai bahan stabilisasi kimia yang berfungsi meningkatkan kekuatan dan kekakuan tanah. Penambahan semen ini memperkuat ikatan antar partikel tanah sehingga meningkatkan nilai CBR dan mengurangi risiko deformasi plastis di bawah beban.

C. Metode Desain

Perencanaan struktur perkerasan jalan merupakan proses krusial dalam pembangunan infrastruktur transportasi. Tujuannya adalah menentukan ketebalan dan susunan lapisan perkerasan agar mampu menahan beban lalu lintas selama umur rencana, serta menjamin kenyamanan dan keselamatan pengguna jalan. Masing-masing metode memiliki asumsi dasar, parameter input, dan prosedur perhitungan yang berbeda, namun bertujuan sama: menjamin kinerja dan umur layanan struktur jalan secara optimal.

1. Metode Desain CBR

Metode CBR merupakan metode desain yang paling sederhana dan banyak digunakan di negara berkembang, termasuk Indonesia. Metode ini mengacu pada nilai CBR tanah dasar (*Subgrade*) untuk menentukan tebal lapisan perkerasan. CBR diukur dalam persentase, dan semakin tinggi nilainya, semakin kuat tanah dasar tersebut. Umumnya digunakan untuk jalan lokal, jalan provinsi, dan jalan dengan lalu lintas ringan hingga sedang. Berdasarkan SNI 1744:2012, prosedur umum meliputi:

- a. Menentukan data lalu lintas dalam satuan ESA (*Equivalent Single Axle Load*) selama umur rencana.
- b. Menentukan nilai CBR *Subgrade*, baik dari pengujian laboratorium maupun lapangan.
- c. Menentukan tebal total lapisan perkerasan (T) menggunakan kurva desain atau formula empiris.
- d. Membagi ketebalan total ke dalam lapisan *surface*, *base*, dan *subbase*.

2. Metode AASHTO (1993/2018)

Metode AASHTO 1993 adalah metode desain perkerasan berdasarkan hasil uji jalan AASHO Road Test yang dikembangkan di Amerika Serikat. Metode ini merupakan pendekatan empiris-mekanis, dengan mempertimbangkan beban lalu lintas, kekuatan tanah dasar (*resilient modulus*), dan indikator reliabilitas. Versi terbaru yaitu AASHTO 2018 mulai mengadopsi pendekatan desain mekanistik-empiris (M-E Design) dengan software khusus seperti AASHTOWare Pavement ME. Parameter utama:

- a. W18: Jumlah kumulatif kendaraan sumbu tunggal ekuivalen selama umur rencana.
- b. MR: Modulus Resilien *Subgrade* (psi atau MPa).
- c. ZR: Z-score yang mencerminkan tingkat reliabilitas.
- d. S0: Variasi standar dari estimasi kinerja.
- e. ΔPSI: Perubahan nilai Serviceability Index (penurunan kenyamanan jalan).

Rumus umum AASHTO 1993:

$$\log(W18) = ZR \times S0 + 9.36 \times \log(SN + 1) - 0.20 + \log(\Delta PSI / (4.2 - 1.5)) / (0.4 + (1094 / (SN + 1)^{5.19})) + 2.32 \times \log(MR) - 8.07$$

Keterangan:

- a. SN (Structural Number) merupakan total kekuatan struktural dari seluruh lapisan perkerasan.
- b. $SN = a_1D_1 + a_2D_2m_2 + a_3D_3m_3$

3. Metode Bina Marga (Indonesia)

Metode Bina Marga dikembangkan oleh Direktorat Jenderal Bina Marga Kementerian PUPR, dan digunakan secara luas di Indonesia. Dokumen acuan utama:

- a. Manual Desain Perkerasan Jalan
- b. SNI 1744:2012
- c. Tata Cara Perencanaan Geometrik dan Perkerasan Jalan (2017)
 - 1) Kategori Jalan
 - a) Jalan Nasional (Tol dan Non-Tol)
 - b) Jalan Provinsi dan Kabupaten
 - c) Jalan Perkotaan dan Pedesaan
 - 2) Parameter Utama
 - a) Volume lalu lintas harian rata-rata (LHR)
 - b) Kelas jalan (fungsi jalan dan klasifikasinya)
 - c) Nilai CBR tanah dasar
 - d) Kondisi drainase
 - e) Faktor lingkungan
 - 3) Pendekatan Desain

Metode Bina Marga merupakan metode desain perkerasan jalan yang banyak digunakan di Indonesia dengan pendekatan yang praktis dan adaptif terhadap kondisi lokal. Metode ini mengandalkan kurva desain yang berbasis nilai *California Bearing Ratio* (CBR) sebagai indikator kekuatan

Subgrade dan estimasi volume lalu lintas yang dinyatakan dalam *Equivalent Standard Axle* (ESA). Dengan pendekatan ini, perancang jalan dapat menentukan ketebalan lapisan perkerasan yang sesuai dengan kondisi tanah dan intensitas lalu lintas, sehingga struktur jalan yang dihasilkan dapat tahan lama dan efisien.

4. Perbandingan Ketiga Metode

Aspek	CBR	AASHTO	Bina Marga
Jenis pendekatan	Empiris	Empiris-Mekanis	Empiris
Kompleksitas	Rendah	Tinggi	Sedang
Parameter utama	CBR, ESA	W18, MR, ZR, SN	CBR, ESA, LHR
Cocok untuk	Jalan lokal, akses desa	Jalan nasional, tol, heavy road	Jalan nasional & daerah
Kebutuhan data lapangan	Rendah	Tinggi	Sedang
Kebutuhan software	Tidak	Ya (Pavement ME)	Tidak

5. Studi Kasus

a. Proyek Jalan Tol Trans Sumatera

Proyek Jalan Tol Trans Sumatera merupakan salah satu proyek infrastruktur strategis yang menghubungkan berbagai wilayah di Pulau Sumatera. Dalam perancangan struktur perkerasan jalan tol ini, metode AASHTO 1993 dipilih sebagai dasar perhitungan ketebalan lapisan perkerasan. Metode ini dilengkapi dengan simulasi menggunakan perangkat lunak khusus untuk memastikan ketepatan desain mekanistik-empiris, sehingga dapat menangani beban lalu lintas yang sangat berat dan bervariasi. Pendekatan ini memungkinkan perhitungan yang lebih akurat dalam menyesuaikan ketebalan lapisan berdasarkan kondisi nyata di lapangan.

Salah satu tantangan utama dalam proyek ini adalah kondisi *Subgrade* yang memiliki nilai CBR bervariasi antara 5% hingga 12%. Variasi ini menunjukkan perbedaan kekuatan tanah dasar

yang cukup signifikan, sehingga memerlukan penyesuaian dalam desain perkerasan. Nilai CBR yang rendah di beberapa titik mengharuskan penggunaan lapisan perkerasan yang lebih tebal untuk menahan beban kendaraan berat dan mengurangi risiko kerusakan seperti retak atau deformasi permanen. Simulasi dengan software membantu mengidentifikasi ketebalan optimal yang diperlukan untuk setiap segmen jalan berdasarkan karakteristik tanah tersebut.

Hasil penerapan metode AASHTO 1993 dengan simulasi perangkat lunak pada Proyek Jalan Tol Trans Sumatera menunjukkan peningkatan efisiensi dan keandalan desain. Struktur perkerasan yang dihasilkan mampu menahan beban lalu lintas berat dalam jangka panjang dengan performa yang lebih baik. Selain itu, metode ini juga membantu mengurangi biaya pemeliharaan akibat kerusakan jalan yang tidak terduga.

b. Jalan Kabupaten di Sulawesi Selatan

Proyek pembangunan jalan kabupaten di Sulawesi Selatan menggunakan metode desain perkerasan yang mengacu pada pedoman Bina Marga, yang berbasis pada nilai CBR dan Lalu Lintas Harian Rata-rata (LHR). Metode ini dianggap efektif untuk kondisi jalan dengan volume lalu lintas sedang dan kekuatan *Subgrade* yang bervariasi. Desain perkerasan jalan pada proyek ini menetapkan ketebalan total lapisan perkerasan sebesar 35 cm, yang dirancang untuk memberikan kekuatan dan daya tahan yang memadai terhadap beban kendaraan yang melintas.

Salah satu fokus utama dalam proyek ini adalah meningkatkan stabilitas *Subgrade* yang pada dasarnya memiliki nilai CBR rendah, yang dapat menyebabkan deformasi dan penurunan kualitas perkerasan. Untuk itu, dilakukan perbaikan *Subgrade* dengan penambahan kapur sebagai bahan stabilisasi kimia. Pemberian kapur berfungsi untuk memperbaiki sifat fisik dan mekanik tanah, seperti mengurangi kadar air dan meningkatkan kekuatan geser tanah. Hal ini penting untuk mendukung ketahanan lapisan perkerasan di atasnya dan mengurangi risiko kerusakan akibat pergerakan tanah yang tidak diinginkan.

Hasil penerapan metode Bina Marga dan stabilisasi kapur pada jalan kabupaten di Sulawesi Selatan ini menunjukkan

peningkatan performa jalan yang signifikan. Ketebalan lapisan perkerasan 35 cm mampu menahan beban kendaraan sesuai dengan proyeksi LHR, sementara stabilisasi *Subgrade* dengan kapur memberikan dasar yang lebih kokoh dan stabil.

D. Perkerasan Lentur Vs. Perkerasan Kaku

Pada perencanaan struktur perkerasan jalan, terdapat dua jenis utama yang umum digunakan yaitu perkerasan lentur (*flexible pavement*) dan perkerasan kaku (*rigid pavement*). Pemilihan antara kedua jenis perkerasan ini sangat bergantung pada kondisi lalu lintas, kondisi tanah dasar, ketersediaan material, biaya, serta aspek teknis dan lingkungan. Pemahaman mendalam mengenai karakteristik, kelebihan, kelemahan, serta aplikasi perkerasan lentur dan kaku menjadi penting untuk memastikan fungsi jalan yang optimal dan umur rencana yang sesuai (Yunus *et al.*, 2025). Perkerasan lentur terdiri dari beberapa lapisan material granular dan aspal yang bersifat elastis dan menyebarkan beban secara bertahap ke lapisan di bawahnya. Struktur ini mampu mengikuti deformasi tanah dasar, dengan permukaan yang umumnya menggunakan aspal beton. Karakteristik utama:

1. Fleksibel terhadap deformasi permukaan.
2. Beban diteruskan ke lapisan bawah secara bertahap melalui distribusi tegangan.
3. Umur rencana biasanya 15-20 tahun, tergantung pemeliharaan.
4. Rentan terhadap suhu tinggi dan oksidasi aspal.
5. Perbaikan relatif mudah dengan *overlay*.

Perkerasan kaku menggunakan beton semen sebagai lapisan permukaan yang memiliki modulus elastisitas tinggi dan kekakuan yang signifikan sehingga mampu menahan beban secara langsung (Sari, 2024). Karakteristik utama:

1. Struktur kaku yang menahan beban secara langsung tanpa banyak deformasi.
2. Beban diteruskan ke tanah dasar melalui distribusi tekanan yang lebih luas.
3. Umur rencana lebih panjang, biasanya 20-30 tahun.
4. Memiliki ketahanan terhadap suhu dan deformasi yang lebih baik.
5. Biaya awal pembangunan lebih tinggi dibandingkan perkerasan lentur.

a. Komponen Struktur

Komponen	Perkerasan Lentur	Perkerasan Kaku
Lapisan permukaan	Aspal beton (AC)	Beton semen (PCC)
Lapisan bawah	<i>Base Course</i> dan subbase granular	Base granular atau langsung tanah dasar
Fungsi utama	Menyebarkan beban secara elastis	Menahan beban dengan kekakuan beton
Penanganan retak	Retak aspal dapat diperbaiki dengan <i>overlay</i>	Retak beton memerlukan perbaikan khusus

b. Perbedaan Teknis Perkerasan Lentur dan Kaku

1) Perilaku Mekanis

Perkerasan lentur dan perkerasan kaku memiliki perilaku mekanis yang sangat berbeda dalam menahan beban lalu lintas. Perkerasan lentur terbuat dari campuran aspal yang bersifat elastis, memungkinkan lapisan ini untuk mengalami deformasi ketika menerima beban dan kemudian kembali ke bentuk semula setelah beban hilang. Karakter elastis ini memungkinkan perkerasan lentur untuk mendistribusikan tegangan dan deformasi secara bertahap ke lapisan bawah, sehingga beban tidak langsung diteruskan ke tanah dasar. Fleksibilitas ini membuat perkerasan lentur mampu menyesuaikan diri terhadap perubahan beban dan kondisi tanah, meskipun lama kelamaan dapat terjadi kerusakan seperti retak atau deformasi permanen.

Perkerasan kaku menggunakan beton dengan kekakuan tinggi yang membuatnya kurang elastis dan lebih kaku dibandingkan perkerasan lentur. Beban yang diterima oleh perkerasan kaku langsung diteruskan ke tanah dasar melalui beton dengan distribusi tekanan yang luas. Beton berperan sebagai pelat yang menopang beban kendaraan sehingga tekanan pada tanah dasar relatif tersebar secara merata. Karena sifatnya yang kaku, perkerasan ini cenderung lebih tahan terhadap deformasi permanen dan retak akibat beban berulang, tetapi juga lebih rentan terhadap retak akibat perubahan suhu dan penyusutan material.

2) Respons terhadap Beban dan Lingkungan

Perkerasan lentur dan perkerasan kaku menunjukkan respons yang berbeda terhadap beban dan kondisi lingkungan, terutama perubahan suhu dan cuaca. Perkerasan lentur yang menggunakan material aspal memiliki sifat termoplastik, sehingga sangat sensitif terhadap fluktuasi suhu. Pada suhu tinggi, aspal bisa melunak dan mengalami deformasi plastis, yang menyebabkan permukaan jalan menjadi lembek dan mudah berubah bentuk, terutama di bawah beban kendaraan berat. Sebaliknya, pada suhu rendah, aspal menjadi lebih kaku dan rentan mengalami retak akibat pengerasan material, yang dapat menurunkan umur perkerasan dan menyebabkan kerusakan lebih cepat jika tidak ditangani dengan baik.

Perkerasan kaku yang terbuat dari beton menunjukkan ketahanan lebih baik terhadap perubahan suhu karena sifat materialnya yang tidak mudah melunak. Beton mampu menahan suhu tinggi tanpa mengalami deformasi plastis seperti pada aspal. Namun, perkerasan kaku lebih rentan terhadap retak yang disebabkan oleh penyusutan (*shrinkage*) akibat proses pengeringan dan perubahan suhu yang menyebabkan ekspansi dan kontraksi. Selain itu, beban berulang dari lalu lintas berat juga berkontribusi pada munculnya retak pada perkerasan kaku, terutama jika struktur beton tidak dirancang dengan baik untuk menahan tegangan tersebut.

3) Kebutuhan Perawatan

Perkerasan lentur umumnya memerlukan perawatan yang lebih intensif dan rutin dibandingkan dengan perkerasan kaku. Hal ini dikarenakan sifat material aspal yang rentan terhadap berbagai jenis kerusakan seperti retak, deformasi plastis, dan aus akibat beban lalu lintas serta perubahan suhu. Oleh karena itu, pemeliharaan perkerasan lentur biasanya melibatkan kegiatan seperti penanganan retak kecil sebelum meluas, pengaspalan ulang (*resurfacing*), serta penambahan lapisan *overlay* untuk memperpanjang umur jalan dan meningkatkan kualitas permukaan. Perawatan yang dilakukan secara berkala sangat penting untuk menjaga

performa perkerasan lentur agar tetap optimal dan mencegah kerusakan lebih serius.

Perkerasan kaku memiliki kebutuhan perawatan yang relatif minimal dalam jangka pendek karena ketahanan beton terhadap keausan dan deformasi lebih baik dibandingkan aspal. Namun, apabila terjadi kerusakan pada perkerasan kaku seperti retak besar, kerusakan sambungan, atau penurunan permukaan, proses perbaikannya menjadi lebih kompleks dan memerlukan biaya yang jauh lebih tinggi. Perbaikan ini melibatkan pekerjaan rekonstruksi atau penggantian blok beton yang rusak, serta perbaikan sambungan yang memerlukan tenaga kerja dan peralatan khusus.

c. Faktor Pemilihan Perkerasan Lentur dan Kaku

Pemilihan jenis perkerasan didasarkan pada beberapa aspek teknis, ekonomi, dan lingkungan:

Faktor	Perkerasan Lentur	Perkerasan Kaku
Kondisi tanah dasar	Cocok untuk tanah lunak hingga sedang	Lebih cocok untuk tanah keras dan stabil
Volume lalu lintas	Jalan dengan lalu lintas ringan sampai sedang	Jalan dengan lalu lintas berat dan sangat berat
Ketersediaan material	Aspal dan agregat tersedia dan murah	Ketersediaan semen dan agregat berkualitas tinggi
Biaya awal	Lebih rendah	Lebih tinggi
Umur layanan	10-20 tahun	20-30 tahun
Pemeliharaan	Perlu pemeliharaan berkala	Perawatan minim tapi sulit dan mahal saat rusak
Dampak lingkungan	Lebih tinggi (pembuatan aspal, emisi)	Lebih ramah lingkungan jika menggunakan beton hemat energi

d. Studi Kasus dan Implementasi di Indonesia

1) Perkerasan Lentur

Perkerasan lentur merupakan pilihan umum untuk jalan nasional dan provinsi di Indonesia yang memiliki volume lalu lintas rendah hingga sedang. Jenis perkerasan ini banyak digunakan karena fleksibilitasnya dalam menyesuaikan dengan kondisi tanah dasar dan kemudahan dalam pelaksanaan serta pemeliharannya. Contoh nyata penerapan perkerasan lentur dapat ditemukan pada jalan akses di daerah pedesaan maupun perkotaan, yang mendukung mobilitas masyarakat dan distribusi barang secara efisien. Dengan karakteristik yang elastis, perkerasan lentur mampu mendistribusikan beban lalu lintas secara bertahap sehingga mengurangi risiko kerusakan permanen pada lapisan bawah jalan.

Pada proyek jalan dengan perkerasan lentur, teknik stabilisasi tanah sering kali diterapkan pada lapisan bawah untuk meningkatkan kekuatan dan ketahanan tanah dasar. Stabilisasi ini penting terutama pada daerah dengan kondisi tanah lemah atau mudah bergeser, yang jika tidak ditangani dapat menyebabkan penurunan kualitas perkerasan dan mempercepat kerusakan jalan.

2) Perkerasan Kaku

Perkerasan kaku menjadi pilihan utama untuk jalan tol dan jalan nasional yang mengalami lalu lintas berat di Indonesia, terutama pada ruas-ruas strategis seperti tol Trans-Jawa dan Trans-Sumatera. Konstruksi perkerasan kaku menggunakan beton semen yang memiliki kekakuan tinggi, sehingga mampu menahan beban sumbu kendaraan berat secara efektif. Hal ini sangat penting mengingat volume dan berat kendaraan di jalan tol tersebut cenderung tinggi, sehingga membutuhkan struktur perkerasan yang kuat dan tahan lama untuk menghindari kerusakan dini yang dapat mengganggu kelancaran lalu lintas dan menimbulkan biaya perbaikan yang besar.

Salah satu keuntungan utama penggunaan perkerasan kaku pada jalan tol dan jalan nasional adalah umur pemakaian yang lebih panjang dibandingkan perkerasan lentur. Beton

semen mampu menahan beban berat tanpa mengalami deformasi plastis yang signifikan, sehingga struktur jalan tetap stabil meskipun menerima beban kendaraan berat secara berulang. Selain itu, perkerasan kaku memiliki ketahanan yang baik terhadap berbagai kondisi lingkungan seperti perubahan suhu ekstrem dan cuaca basah, yang sering ditemui di wilayah lintas Pulau Jawa dan Sumatera. Ketahanan ini membantu mengurangi frekuensi perawatan rutin yang biasanya diperlukan pada perkerasan lentur.

e. Perbandingan Biaya dan Efektivitas

Perbandingan biaya dan efektivitas antara perkerasan lentur dan perkerasan kaku menjadi aspek penting dalam pemilihan jenis perkerasan untuk jalan, terutama yang memiliki volume lalu lintas tinggi. Menurut penelitian terbaru oleh Yulianto dan Hadi (2021), meskipun biaya awal pembangunan perkerasan kaku cenderung lebih mahal, yaitu mencapai 1,5 hingga 2 kali lipat dari biaya perkerasan lentur, perkerasan kaku menawarkan keuntungan ekonomis jangka panjang yang signifikan. Biaya awal yang tinggi tersebut terutama disebabkan oleh material beton semen yang lebih mahal dan proses konstruksi yang lebih rumit serta memakan waktu lebih lama.

Keunggulan perkerasan kaku terletak pada biaya perawatan yang jauh lebih rendah dibandingkan perkerasan lentur. Perkerasan lentur, yang menggunakan campuran aspal, memerlukan perawatan rutin seperti pengaspalan ulang dan penanganan retak yang sering terjadi akibat perubahan suhu dan beban lalu lintas. Sedangkan perkerasan kaku memiliki daya tahan yang lebih baik terhadap beban berat dan kondisi lingkungan, sehingga frekuensi perawatan dan perbaikan menjadi lebih sedikit. Hal ini secara signifikan mengurangi biaya operasional dan pemeliharaan sepanjang umur jalan.



BAB V

PERSIAPAN DAN PEKERJAAN TANAH

DASAR

Tahap persiapan dan pekerjaan tanah dasar yang merupakan fondasi utama dalam konstruksi perkerasan jalan. Tanah dasar yang baik sangat menentukan kekuatan, daya dukung, dan umur perkerasan jalan. Oleh karena itu, pekerjaan persiapan tanah dasar meliputi pembersihan area kerja, perataan, pemadatan, stabilisasi jika diperlukan, dan pengelolaan drainase. Setiap tahap harus dilaksanakan secara teliti sesuai standar teknis untuk memastikan kestabilan tanah dasar sebelum lapisan perkerasan dibangun.

Pembersihan dan perataan area kerja bertujuan menghilangkan material yang tidak stabil, vegetasi, dan benda asing yang dapat mengganggu kestabilan tanah. Selanjutnya, pemadatan tanah dasar sangat penting untuk meningkatkan kepadatan dan mengurangi permeabilitas tanah. Metode dan alat pemadatan yang digunakan harus sesuai karakteristik tanah dan beban yang akan diterima. Selain itu, pengujian kepadatan lapangan wajib dilakukan untuk memastikan tanah dasar memenuhi spesifikasi teknis yang ditetapkan.

A. Pembersihan dan Perataan Area Kerja

Pekerjaan persiapan tanah dasar adalah tahap awal yang sangat penting dalam pembangunan perkerasan jalan karena akan menentukan kestabilan dan daya dukung lapisan-lapisan di atasnya. Salah satu kegiatan utama dalam tahap ini adalah pembersihan dan perataan area kerja, yang bertujuan untuk memastikan kondisi dasar yang baik, bebas dari penghalang, serta rata sesuai elevasi dan kemiringan yang direncanakan. Tahap pembersihan dan perataan sangat mempengaruhi kualitas dan umur perkerasan jalan serta meminimalkan risiko kerusakan akibat pergerakan tanah atau kelembaban yang tidak terkendali.

Pembersihan area kerja adalah proses menghilangkan semua material atau objek yang tidak diperlukan dan dapat mengganggu pelaksanaan pekerjaan, seperti vegetasi (pohon, semak), sampah, batu besar, puing, dan benda asing lainnya. Kegiatan ini juga mencakup penebangan pohon, penggalian akar, dan pembuangan bahan organik yang dapat merusak struktur perkerasan di kemudian hari. Perataan area kerja adalah proses menghilangkan ketidakrataan permukaan tanah, menyesuaikan elevasi dan kontur sesuai dengan rencana desain. Proses ini bertujuan untuk mendapatkan permukaan kerja yang rata dan stabil untuk mendukung lapisan-lapisan perkerasan selanjutnya (Ahmad *et al.*, 2024).

1. Tahapan Pembersihan dan Perataan Area Kerja

a. Survei dan Penandaan Area Kerja

Tahapan awal dalam proses pembersihan dan perataan area kerja dimulai dengan survei dan penandaan area kerja yang cermat. Survei topografi dilakukan untuk memetakan kondisi medan secara detail, termasuk menentukan batas-batas area yang akan dibersihkan dan diratakan. Selain itu, survei ini juga mencatat elevasi tanah serta lokasi vegetasi, batu besar, dan benda asing lain yang harus dihilangkan sebelum pekerjaan konstruksi dapat dilanjutkan. Informasi yang diperoleh dari survei ini menjadi dasar penting untuk perencanaan dan pelaksanaan pekerjaan yang tepat dan efisien.

Setelah survei selesai, tahap berikutnya adalah melakukan penandaan secara fisik di lapangan. Penandaan ini dilakukan dengan menggunakan patok, tali, atau tanda lain yang jelas terlihat untuk menunjukkan batas area kerja sesuai dengan hasil survei. Penandaan ini berfungsi sebagai panduan agar proses pembersihan dan perataan tidak meluas ke area di luar yang telah ditentukan. Dengan demikian, pekerjaan dapat dilakukan secara terkendali, meminimalkan gangguan terhadap lingkungan sekitar dan mencegah kerusakan yang tidak perlu pada vegetasi atau struktur yang tidak menjadi bagian dari proyek.

b. Pembersihan Vegetasi dan Benda Asing

Tahapan pembersihan vegetasi dan benda asing merupakan bagian penting dalam persiapan area kerja yang bertujuan untuk menciptakan lahan yang siap untuk pembangunan. Proses ini

meliputi berbagai aktivitas seperti penebangan pohon yang menghalangi jalur konstruksi, pembersihan semak belukar yang tumbuh di area proyek, serta penggalian dan pengangkatan akar pohon yang menancap kuat di dalam tanah. Selain itu, batu besar yang tidak dapat dihilangkan dengan cara biasa serta sampah atau material asing lainnya juga harus dibersihkan dari lokasi agar tidak mengganggu proses pekerjaan selanjutnya.

Untuk mempercepat dan mempermudah pekerjaan, penggunaan alat berat seperti bulldozer, excavator, dan chainsaw sangat umum diterapkan. Bulldozer digunakan untuk meratakan dan menggeser material, sedangkan excavator berfungsi menggali dan mengangkat benda besar seperti akar atau batu. Chainsaw sangat efektif untuk menebang pohon dengan cepat dan rapi. Pemilihan alat berat disesuaikan dengan kondisi medan dan jenis vegetasi yang ada. Penggunaan alat berat ini juga membantu mengurangi tenaga manual, sehingga proses pembersihan dapat berlangsung lebih efisien dan tepat waktu.

c. Perataan dan Pemadatan Awal

Setelah proses pembersihan vegetasi dan penghilangan benda asing selesai, tahapan selanjutnya adalah perataan dan pemadatan awal area kerja. Perataan permukaan tanah dilakukan dengan menggunakan alat berat seperti grader dan bulldozer. Grader berfungsi untuk menghaluskan dan meratakan permukaan tanah sesuai dengan elevasi dan kemiringan yang telah direncanakan dalam desain konstruksi. Proses ini sangat penting agar permukaan tanah menjadi rata dan sesuai standar, sehingga memudahkan pekerjaan konstruksi berikutnya dan menghindari masalah seperti genangan air atau ketidakstabilan tanah.

Setelah perataan selesai, dilakukan pemadatan awal menggunakan roller tipe ringan. Pemadatan ini bertujuan untuk memperbaiki kepadatan tanah permukaan dan mengurangi risiko penurunan tanah yang tidak merata selama tahap konstruksi selanjutnya. Tanah yang tidak dipadatkan dengan baik dapat menyebabkan permukaan menjadi tidak stabil dan berpotensi menimbulkan kerusakan pada struktur jalan atau bangunan yang dibangun di atasnya. Penggunaan roller ringan sangat efektif untuk memperbaiki kondisi tanah di lapisan permukaan tanpa merusak struktur tanah di bawahnya.

2. Aspek Teknis Pembersihan dan Perataan

a. Penghapusan Material Organik

Penghapusan material organik merupakan aspek teknis penting dalam tahap pembersihan dan perataan area kerja. Material organik seperti akar pohon, sisa tanaman, dan bahan organik lain yang tersisa di dalam tanah harus dihilangkan secara menyeluruh. Hal ini dikarenakan keberadaan material organik dapat menyebabkan penurunan tanah yang tidak merata dan berpotensi menimbulkan kerusakan pada lapisan perkerasan jalan di masa depan. Material organik cenderung mengalami pembusukan yang menyebabkan perubahan volume tanah, sehingga menimbulkan ketidakstabilan dan penurunan permukaan yang merugikan struktur konstruksi.

Setelah proses penghapusan material organik, perlu dilakukan pengujian kadar material organik yang tersisa di tanah. Pengujian ini bertujuan untuk memastikan bahwa kadar material organik berada pada tingkat yang aman dan tidak akan menimbulkan masalah teknis saat konstruksi berjalan. Apabila kadar material organik masih tinggi, maka perlu dilakukan tindakan stabilisasi tanah untuk meningkatkan kekuatan dan kestabilan *Subgrade*. Stabilisasi ini biasanya dilakukan dengan menambahkan bahan kimia seperti kapur atau semen yang berfungsi mengikat partikel tanah dan mengurangi efek negatif dari material organik.

b. Kontrol Elevasi dan Kemiringan

Kontrol elevasi dan kemiringan merupakan aspek teknis krusial dalam tahap pembersihan dan perataan area kerja. Pengendalian yang ketat terhadap elevasi tanah dasar sangat diperlukan untuk memastikan bahwa permukaan yang akan menjadi fondasi perkerasan jalan sesuai dengan rancangan teknis. Kesesuaian elevasi ini berperan penting dalam menjaga fungsi saluran drainase sehingga air hujan dapat mengalir dengan baik dan tidak tertahan di bawah lapisan perkerasan. Genangan air yang terjadi akibat kontrol elevasi yang buruk dapat menyebabkan kerusakan pada struktur perkerasan akibat pelunakan tanah *Subgrade* dan pengikisan lapisan pondasi.

Kemiringan permukaan juga harus diperhatikan secara teliti. Kemiringan area kerja harus dirancang sedemikian rupa untuk memungkinkan air mengalir ke saluran drainase tanpa tergenang

di permukaan maupun di bawah perkerasan. Kemiringan yang tepat membantu menjaga daya tahan perkerasan dan mengurangi risiko kegagalan konstruksi akibat kelembaban yang berlebihan. Dalam praktiknya, kontrol kemiringan dilakukan dengan menggunakan alat ukur presisi dan penyesuaian lapisan tanah menggunakan alat berat seperti grader. Pengendalian kemiringan ini juga membantu menjaga stabilitas tanah dasar yang menjadi penopang utama lapisan perkerasan.

c. Drainase dan Pengelolaan Air

Pada tahapan pembersihan dan perataan area kerja, aspek drainase dan pengelolaan air berperan sangat penting untuk menjaga kestabilan tanah dasar. Sistem drainase sementara harus dirancang dan diterapkan secara efektif agar air hujan tidak menggenang di area kerja. Genangan air dapat menyebabkan pelunakan dan penurunan kapasitas dukung tanah dasar, yang berpotensi merusak struktur perkerasan yang akan dibangun. Oleh karena itu, pengelolaan air secara tepat sejak awal konstruksi menjadi kunci untuk menjaga kualitas dan ketahanan tanah *Subgrade*.

Penerapan saluran drainase sementara seperti parit pengalir dan gorong-gorong darurat sangat diperlukan untuk mengalirkan air hujan keluar dari lokasi konstruksi. Saluran ini harus dibuat dengan kedalaman dan kemiringan yang sesuai sehingga aliran air dapat berjalan lancar tanpa tersumbat atau menimbulkan erosi berlebihan pada tanah di sekitarnya. Selain itu, kemiringan tanah dasar juga harus direncanakan dan dikontrol dengan seksama untuk memastikan air dapat mengalir dengan baik menuju saluran drainase. Jika kemiringan tidak tepat, air akan menggenang atau mengalir tidak merata sehingga merusak kestabilan *Subgrade*.

B. Pemadatan dan Pengujian Kepadatan

Pemadatan tanah dasar merupakan proses penting dalam konstruksi jalan yang bertujuan untuk meningkatkan densitas tanah sehingga memiliki daya dukung yang optimal terhadap beban lalu lintas. Pemadatan yang tepat dapat mengurangi penurunan permukaan jalan, mencegah deformasi, serta memperpanjang umur perkerasan jalan.

Pengujian kepadatan merupakan tahap verifikasi yang dilakukan untuk memastikan bahwa tingkat pemadatan telah memenuhi spesifikasi teknis sesuai standar yang berlaku, seperti SNI, Bina Marga, dan pedoman internasional lain (AASHTO, ASTM).

Pemadatan tanah adalah proses mekanis yang dilakukan dengan memberi tekanan pada tanah untuk mengurangi jumlah pori-pori udara di dalam tanah, sehingga meningkatkan massa jenis kering dan kekuatan tanah (Holtz *et al.*, 1981). Dalam pekerjaan jalan, pemadatan dilakukan pada tanah dasar setelah tahap pembersihan dan perataan. Parameter utama yang menjadi fokus pemadatan adalah:

1. Kepadatan kering (*dry density*): Massa tanah tanpa kandungan air per satuan volume tanah.
2. Kadar air optimum (*optimum moisture content*): Kadar air di mana tanah mencapai kepadatan maksimum saat dipadatkan.

Pemilihan kadar air yang tepat selama pemadatan sangat krusial agar tanah tidak terlalu kering yang menyebabkan hasil pemadatan kurang optimal, maupun terlalu basah yang mengakibatkan tanah lunak (Das & Sivakugan, 2017). Beberapa standar nasional dan internasional menetapkan persyaratan minimal untuk kepadatan tanah dasar dalam pekerjaan perkerasan jalan, antara lain:

1. Bina Marga (2020): Pedoman teknis proyek jalan nasional menetapkan tingkat kepadatan minimal 95% untuk tanah dasar dan 98% untuk lapisan pondasi.
2. AASHTO T99 (*Standard Proctor*) dan AASHTO T180 (*Modified Proctor*): Standar internasional yang digunakan untuk menentukan kepadatan maksimum dan kadar air optimum dalam uji laboratorium.

Faktor yang mempengaruhi pemadatan dan kepadatan:

1. Kadar air: Harus dijaga agar mendekati kadar air optimum, karena kadar air yang terlalu rendah atau tinggi menurunkan hasil pemadatan.
2. Jenis tanah: Tanah berbutir kasar mudah dipadatkan dengan roller getar, sedangkan tanah lempung memerlukan alat khusus dan perhatian pada kadar air.
3. Teknik pemadatan: Meliputi ketebalan lapisan, jumlah lintasan roller, dan kecepatan pemadatan.
4. Kondisi cuaca: Hujan dapat mempengaruhi kadar air tanah di lapangan dan proses pemadatan.

Pemadatan yang baik meningkatkan modulus elastisitas tanah dasar, sehingga dapat mendukung beban lalu lintas dan mencegah deformasi permanen seperti gelombang (rutting) dan retak (cracking) pada perkerasan lentur maupun kaku. Sebaliknya, pemadatan yang kurang optimal menyebabkan penurunan berlebih, munculnya lubang (potholes), dan umur jalan yang lebih pendek.

1. Jenis Alat Pemadatan

Pemadatan tanah dapat dilakukan dengan berbagai jenis alat, yang dipilih berdasarkan sifat tanah, kedalaman lapisan yang akan dipadatkan, dan luas area kerja. Jenis alat pemadatan yang umum digunakan meliputi:

a. Roller Getar (*Vibratory Roller*)

Roller getar (*vibratory roller*) adalah alat pemadatan yang sangat efektif digunakan untuk tanah berbutir kasar dan lempung berpasir. Alat ini bekerja dengan memanfaatkan getaran mekanis yang kuat untuk mengurangi pori-pori udara dalam tanah, sehingga meningkatkan kepadatan dan stabilitas lapisan tanah yang sedang dipadatkan. Karena kemampuannya menghasilkan getaran yang dalam, roller getar sangat cocok untuk pemadatan lapisan tanah dengan ketebalan yang cukup tebal, sehingga hasil pemadatan menjadi lebih merata dan optimal.

b. Roller Statis (*Static Roller*)

Roller statis (*static roller*) merupakan alat pemadatan yang digunakan khusus untuk tanah lempung dan campuran tanah halus. Berbeda dengan roller getar yang menggunakan getaran, roller statis mengandalkan tekanan berat alat secara statis untuk memampatkan tanah. Tekanan ini bekerja dengan menekan permukaan tanah secara langsung, sehingga butiran tanah menjadi lebih rapat dan kepadatan tanah meningkat. Metode pemadatan ini efektif untuk jenis tanah yang cenderung halus dan sensitif terhadap getaran, sehingga getaran berlebihan dapat menyebabkan kerusakan struktur tanah.

c. *Sheepsfoot Roller*

Sheepsfoot roller adalah alat pemadatan yang memiliki roda berlekuk atau berbentuk seperti kaki domba (*sheep's foot*). Desain roda ini sangat efektif untuk memadatkan tanah lempung dan tanah berbutir halus karena dapat menekan sekaligus

mengaduk tanah secara mekanis. Saat berputar, lekukan pada roda roller ini menembus permukaan tanah, menghasilkan tekanan titik yang membantu merapikan butiran tanah dan mengurangi rongga udara. Proses ini membuat struktur tanah menjadi lebih padat dan stabil, sehingga sangat cocok digunakan untuk memadatkan lapisan *Subgrade* dan tanah dasar yang memiliki kandungan lempung tinggi.

d. Plate Compactor dan Rammer

Plate compactor dan rammer adalah alat pemadatan yang umumnya digunakan untuk area kecil atau lapisan tanah yang tipis, terutama di lokasi yang sulit dijangkau oleh alat berat seperti roller. Plate compactor memiliki plat baja datar yang bergetar untuk memadatkan permukaan tanah atau material agregat, sehingga sangat efektif untuk pekerjaan pemadatan pada area terbatas seperti pinggiran jalan, trotoar, atau fondasi bangunan kecil. Getaran yang dihasilkan membantu mengurangi pori-pori udara dalam tanah, meningkatkan kepadatan dan stabilitas lapisan permukaan.

Rammer atau jumping jack memiliki mekanisme kerja berupa pukulan vertikal berulang yang menekan tanah secara lokal dengan tenaga besar. Alat ini ideal untuk pemadatan tanah di lubang sempit, parit, dan area yang sangat terbatas ruang geraknya. Baik plate compactor maupun rammer memberikan fleksibilitas dan efisiensi dalam pemadatan tanah di kondisi yang tidak memungkinkan penggunaan alat berat besar, sehingga sangat penting dalam pekerjaan konstruksi skala kecil hingga menengah.

2. Teknik Pemadatan

Teknik pemadatan yang efektif sangat bergantung pada pelaksanaan secara bertahap dengan pembentukan lapisan tipis, biasanya berkisar antara 15 hingga 30 cm tebalnya. Setiap lapisan tanah atau material yang akan dipadatkan tidak langsung dilakukan sekaligus dalam ketebalan besar, melainkan secara bertahap agar alat pemadat dapat bekerja optimal menekan dan mengurangi pori udara di dalam tanah. Hal ini sangat penting untuk memastikan bahwa setiap lapisan mencapai tingkat kepadatan yang disyaratkan sebelum dilanjutkan dengan lapisan berikutnya.

Proses pemadatan dilakukan dengan beberapa kali lintasan menggunakan roller atau alat pemadat lain seperti plate compactor dan rammer. Setiap lintasan ini bertujuan untuk menghilangkan ruang kosong dalam tanah yang dapat menyebabkan penurunan atau pergerakan tanah di kemudian hari. Dengan teknik berlapis ini, risiko terbentuknya zona lemah (*weak zone*) dalam tanah dasar dapat diminimalisir. Zona lemah ini jika terbentuk dapat menyebabkan kegagalan struktur perkerasan, seperti retak atau ambles karena tanah tidak cukup kuat menopang beban di atasnya.

3. Pengujian Kepadatan Tanah Dasar

Pengujian kepadatan tanah dasar dilakukan untuk memverifikasi hasil pemadatan agar sesuai dengan spesifikasi proyek. Ada beberapa metode pengujian yang umum digunakan:

a. Metode *Sand Cone* (Kerucut Pasir)

Metode *Sand Cone* atau kerucut pasir merupakan salah satu teknik pengujian kepadatan tanah dasar yang umum digunakan dalam konstruksi jalan dan bangunan. Prinsip dasar dari metode ini adalah mengukur volume lubang yang terbentuk akibat pengambilan contoh tanah di lapangan. Lubang tersebut kemudian diisi dengan pasir standar dari kerucut pasir yang telah diketahui densitasnya. Dengan cara ini, volume lubang dapat dihitung secara akurat berdasarkan jumlah pasir yang digunakan untuk mengisinya.

Setelah volume lubang diketahui, langkah berikutnya adalah menimbang berat sampel tanah yang diambil dari lubang tersebut. Berat tanah ini kemudian dibandingkan dengan volume lubang untuk mendapatkan nilai densitas tanah atau kepadatan keringnya. Informasi ini sangat penting untuk menilai sejauh mana tanah dasar telah dipadatkan sesuai dengan standar yang ditentukan. Semakin tinggi densitas tanah, semakin baik tanah tersebut dalam menahan beban struktur di atasnya, sehingga mengurangi risiko penurunan dan kerusakan.

b. Metode *Nuclear Density Gauge* (Alat Kepadatan Nuklir)

Metode *Nuclear Density Gauge* atau alat kepadatan nuklir merupakan teknik pengujian kepadatan tanah dasar yang menggunakan sumber radioaktif untuk mengukur kepadatan dan kadar air tanah secara cepat dan non-destruktif. Prinsip kerja alat

ini adalah dengan memancarkan partikel neutron ke dalam tanah dan kemudian mendeteksi jumlah partikel yang dipantulkan kembali. Jumlah pantulan ini berhubungan langsung dengan kandungan air dan kepadatan tanah di lokasi pengujian. Karena sifatnya yang cepat, metode ini sangat efektif untuk pengujian di lapangan yang membutuhkan hasil instan dan akurat.

Metode ini banyak digunakan dalam proyek konstruksi besar dan penting, terutama pada proyek jalan tol dan infrastruktur dengan volume pekerjaan yang tinggi. Penggunaan alat kepadatan nuklir memungkinkan pengujian yang cepat tanpa perlu membuat lubang atau mengambil sampel tanah secara langsung, sehingga meminimalkan gangguan pada area kerja. Selain itu, data yang dihasilkan dari pengujian ini dapat segera dianalisis untuk memastikan kualitas pemadatan tanah dasar, sehingga proses konstruksi dapat berjalan lebih efisien dan sesuai standar.

c. Metode *Proctor Test* (Laboratorium)

Metode *Proctor Test* adalah salah satu metode pengujian laboratorium yang digunakan untuk menentukan kepadatan maksimum dan kadar air optimum suatu jenis tanah. Pengujian ini sangat penting dalam perencanaan dan pelaksanaan pekerjaan pemadatan tanah dasar karena memberikan acuan terhadap kondisi terbaik pemadatan tanah di lapangan. Prosedur pengujian melibatkan pemadatan tanah dalam cetakan silinder secara bertahap, dengan variasi kadar air, kemudian diukur berat jenis kering dari tiap sampel untuk mendapatkan grafik hubungan antara kadar air dan kepadatan tanah (Holtz *et al.*, 1981).

Dari grafik tersebut, akan diperoleh nilai kepadatan maksimum (*maximum dry density*) dan kadar air optimum (*optimum moisture content*). Nilai-nilai ini menjadi standar atau target pemadatan yang harus dicapai di lapangan, baik saat menggunakan alat berat seperti roller maupun dalam teknik pemadatan berlapis. Kesesuaian pemadatan di lapangan terhadap hasil uji Proctor sangat berpengaruh terhadap daya dukung tanah dasar serta kestabilan konstruksi perkerasan di atasnya.

C. Drainase Tanah Dasar

Drainase tanah dasar merupakan aspek penting dalam konstruksi jalan karena berperan dalam mengendalikan dan mengalirkan air dari dan di sekitar tanah dasar jalan. Air yang terperangkap di bawah perkerasan atau dalam tanah dasar dapat menurunkan kekuatan dan kestabilan tanah, menyebabkan penurunan mutu perkerasan, serta mempercepat kerusakan seperti retak dan lubang (potholes). Oleh sebab itu, pengelolaan drainase yang efektif adalah salah satu kunci keberhasilan pembangunan jalan yang tahan lama (Chu *et al.*, 2023). Air dalam tanah dasar yang tidak dikendalikan dapat menyebabkan penurunan daya dukung tanah dan peningkatan deformasi, misalnya fenomena gelombang dan retak. Oleh karena itu, perencanaan dan pelaksanaan drainase harus dirancang sejak awal pekerjaan tanah dasar.

1. Jenis-jenis Drainase Tanah Dasar

Drainase tanah dasar dapat dibagi menjadi beberapa jenis berdasarkan sumber dan lokasi air yang dikendalikan:

a. Drainase Permukaan

Drainase permukaan merupakan sistem pengendalian air yang dirancang untuk mengalirkan air hujan atau limpasan dari permukaan jalan ke saluran pembuangan. Sistem ini sangat penting untuk mencegah air tergenang di atas perkerasan jalan atau meresap ke tanah dasar, yang dapat menurunkan daya dukung tanah dan menyebabkan kerusakan struktural seperti retakan dan penurunan permukaan. Air permukaan yang tidak terkendali juga berpotensi merusak bahu jalan dan mempercepat degradasi lapisan perkerasan.

b. Drainase Dalam (*Subsurface Drainage*)

Drainase dalam atau *subsurface drainage* berperan penting dalam menjaga kestabilan tanah dasar dengan mengalirkan air yang berada di bawah permukaan tanah. Sistem ini sangat dibutuhkan di daerah dengan kadar air tanah tinggi atau tanah jenuh, karena air yang terperangkap dalam tanah dapat mengurangi daya dukung tanah dan memperbesar risiko penurunan diferensial. Selain itu, keberadaan air dalam tanah juga dapat menyebabkan tekanan pori yang tinggi, yang berdampak negatif terhadap kekuatan geser tanah.

2. Komponen Drainase Tanah Dasar

a. Saluran Permukaan

Saluran permukaan biasanya berupa:

- 1) Parit terbuka: Digali di sisi badan jalan untuk menampung air limpasan.
- 2) Gorong-gorong: Struktur bawah tanah yang menyalurkan air melintasi badan jalan.
- 3) Rorak atau talang: Saluran kecil di sepanjang pinggir perkerasan.

Konstruksi saluran permukaan harus dirancang agar tidak mudah tersumbat dan mampu mengalirkan air dengan kecepatan yang cukup tanpa menyebabkan erosi.

b. Sistem Drainase Dalam

Untuk tanah dasar yang memiliki masalah kadar air tinggi atau kondisi tanah jenuh, sistem drainase dalam wajib digunakan. Sistem ini meliputi:

- 1) Pipa perforasi: Diletakkan pada kedalaman tertentu dengan lapisan kerikil sebagai filter.
- 2) Geokomposit drainase: Bahan sintetis yang memiliki fungsi menyaring dan mengalirkan air.
- 3) Lapisan pasir dan kerikil: Sebagai media penyaring dan pengalir air.

Penerapan sistem ini bertujuan menurunkan muka air tanah sehingga memperbaiki sifat mekanik tanah dasar.

3. Teknik Pelaksanaan Drainase

a. Penggalian dan Pemasangan Saluran

Tahapan pelaksanaan drainase tanah dasar diawali dengan proses penggalian parit dan saluran, yang harus dilakukan secara hati-hati dan sesuai dengan desain teknis. Desain ini mencakup kedalaman, lebar, dan kemiringan saluran agar air dapat mengalir secara gravitasi dengan lancar. Kesalahan dalam penggalian, seperti kemiringan yang tidak sesuai, dapat menyebabkan air tergenang dan menimbulkan kerusakan pada struktur tanah dasar. Oleh karena itu, pengukuran elevasi dan sudut kemiringan harus dilakukan secara cermat menggunakan alat seperti automatic level atau total station.

Tahap berikutnya adalah pemasangan saluran, yang dapat berupa gorong-gorong, pipa beton, pipa perforasi, atau saluran terbuka tergantung dari fungsi dan lokasi. Untuk pipa perforasi yang digunakan dalam sistem drainase bawah permukaan, perlu dilapisi *Geotekstil* atau geokomposit agar partikel halus tidak masuk dan menyumbat pipa. Sambungan antar pipa juga harus dibuat rapat dan kedap air guna menghindari kebocoran yang bisa menyebabkan tanah di sekitarnya mengalami erosi atau amblesan.

b. Penggunaan *Geotekstil*

Penggunaan *Geotekstil* dalam sistem drainase tanah dasar merupakan salah satu teknik penting untuk meningkatkan efisiensi dan keawetan saluran drainase, khususnya pada sistem drainase bawah permukaan. *Geotekstil* berfungsi sebagai lapisan pemisah sekaligus penyaring (filter) antara tanah dasar dan media drainase seperti kerikil atau pipa perforasi. Fungsi penyaringan ini sangat vital karena mencegah partikel halus dari tanah masuk ke dalam saluran air, yang dapat menyebabkan penyumbatan dan menurunkan efektivitas sistem drainase secara keseluruhan (Rokade *et al.*, 2012).

Jenis *Geotekstil* yang digunakan tergantung pada kondisi lapangan dan kebutuhan teknis. Secara umum, terdapat dua jenis utama yaitu *Geotekstil woven* (tenun) dan *non-woven* (tak tenun). *Geotekstil woven* memiliki kekuatan tarik yang tinggi dan cocok digunakan di area yang membutuhkan stabilisasi tambahan. Sementara itu, *Geotekstil non-woven* memiliki permeabilitas yang lebih tinggi dan biasanya lebih efektif untuk fungsi filtrasi dan drainase. Pemilihan jenis ini harus mempertimbangkan karakteristik tanah, potensi penyumbatan, dan debit aliran air yang akan ditangani.

c. Penimbunan dan Pemadatan

Tahapan penimbunan dan pemadatan merupakan bagian krusial dalam teknik pelaksanaan drainase untuk memastikan sistem tetap stabil dan berfungsi optimal dalam jangka panjang. Setelah pemasangan saluran seperti gorong-gorong, pipa perforasi, atau elemen drainase lainnya, area galian harus segera ditimbun kembali menggunakan material yang sesuai spesifikasi teknis.

Proses ini dilakukan bertahap, dimulai dari sisi saluran agar tidak menimbulkan pergeseran atau kerusakan pada struktur saluran yang baru dipasang.

Material timbunan yang digunakan sebaiknya terdiri dari tanah pilihan atau agregat granular yang bersih dan bebas dari bahan organik. Penimbunan dilakukan secara berlapis dengan ketebalan antara 15–30 cm, lalu tiap lapisan dipadatkan sesuai standar kepadatan yang disyaratkan. Pemadatan ini penting untuk mencegah terjadinya rongga udara dan potensi penurunan (*settlement*) tanah di kemudian hari. Jika pemadatan tidak dilakukan dengan benar, maka saluran drainase dapat mengalami keretakan atau bahkan keruntuhan karena beban berlebih dari atas atau aliran air yang tidak terkendali.

4. Evaluasi Kinerja Sistem Drainase

Evaluasi kinerja drainase dilakukan dengan:

- a. Pengamatan visual: Memastikan saluran bebas dari penyumbatan dan air mengalir lancar.
- b. Pengukuran muka air tanah: Menggunakan piezometer untuk memantau efektivitas penurunan kadar air tanah dasar.
- c. Uji laboratorium tanah: Mengamati perubahan sifat fisik tanah akibat pengelolaan drainase.

Drainase yang efektif terbukti meningkatkan kekuatan tanah dasar dan mengurangi deformasi perkerasan.

D. Stabilisasi Tanah

Stabilisasi tanah merupakan salah satu teknik penting dalam pekerjaan tanah dasar pada konstruksi jalan, terutama ketika tanah asli (*Subgrade*) tidak memenuhi kriteria kekuatan dan kestabilan yang diperlukan. Stabilisasi bertujuan untuk meningkatkan sifat fisik, mekanik, dan kadang sifat kimia tanah sehingga menjadi lebih stabil, kuat, dan tahan lama terhadap beban lalu lintas dan pengaruh lingkungan (Kumar & Singh, 2023). Dengan demikian, stabilisasi tanah dapat memperpanjang umur perkerasan dan mengurangi risiko kerusakan jalan akibat deformasi tanah dasar. Stabilisasi tanah adalah proses perbaikan sifat tanah dengan penambahan bahan tertentu atau perlakuan mekanis untuk meningkatkan daya dukung dan kestabilannya. Penilaian

kebutuhan stabilisasi dilakukan melalui uji laboratorium dan inspeksi lapangan.

1. Metode Stabilisasi Tanah Mekanis

Stabilisasi mekanis dilakukan dengan mengubah struktur fisik tanah melalui pencampuran, pengadukan, pemadatan ulang, atau pemberian tekanan tertentu. Contoh metode mekanis:

a. Pemadatan Ulang

Pemadatan ulang merupakan salah satu metode stabilisasi tanah secara mekanis yang paling umum digunakan dalam pekerjaan konstruksi jalan dan pondasi. Metode ini bertujuan untuk meningkatkan densitas atau kerapatan tanah, sehingga daya dukungnya meningkat dan risiko penurunan diferensial dapat diminimalkan. Proses ini dilakukan dengan menggemburkan terlebih dahulu tanah asli yang telah ada, kemudian dilakukan pemadatan ulang menggunakan alat berat seperti roller getar, sheepsfoot roller, atau rammer, tergantung jenis tanah dan kedalaman lapisan yang akan dipadatkan.

Pada pelaksanaannya, pemadatan ulang dilakukan secara bertahap dengan metode berlapis (*layer by layer*), di mana setiap lapisan tanah biasanya memiliki ketebalan antara 15 hingga 30 cm sebelum dipadatkan. Tujuan dari metode ini adalah untuk memastikan bahwa setiap lapisan memperoleh kepadatan maksimal dan tidak menyisakan rongga udara (*voids*) yang dapat memicu penurunan di masa depan. Tingkat kepadatan tanah yang dicapai kemudian diuji menggunakan metode seperti *sand cone test* atau *nuclear density gauge* untuk memastikan kesesuaian dengan spesifikasi teknis yang ditetapkan.

b. Pencampuran Tanah

Pencampuran tanah merupakan salah satu metode stabilisasi mekanis yang dilakukan dengan mencampur tanah asli dengan bahan inert atau bahan keras lainnya guna meningkatkan kekuatan, kestabilan, dan daya dukung tanah. Teknik ini dilakukan dengan mencampur dua atau lebih jenis tanah yang memiliki karakteristik berbeda, seperti mencampur tanah lempung plastis tinggi dengan pasir atau kerikil agar tercipta struktur tanah baru yang lebih stabil dan lebih mudah dipadatkan.

Tujuan utamanya adalah mengubah sifat fisik tanah agar lebih sesuai dengan kebutuhan konstruksi.

Proses pencampuran dilakukan secara menyeluruh menggunakan alat mekanis seperti motor grader, *rotary mixer*, atau alat pencampur manual tergantung skala pekerjaan. Pencampuran harus homogen agar distribusi material tambahan merata dalam seluruh volume tanah. Misalnya, pada tanah yang terlalu plastis atau jenuh air, penambahan bahan keras seperti pasir, abu batu, atau bahan granular lainnya dapat mengurangi kelengketan dan meningkatkan sifat drainase. Dalam beberapa kasus, pencampuran ini juga dilakukan bersamaan dengan teknik pemadatan agar hasilnya lebih optimal.

c. Pengeringan Tanah

Pengeringan tanah merupakan salah satu metode stabilisasi tanah secara mekanis yang bertujuan untuk mengurangi kadar air berlebih dalam tanah, sehingga tanah menjadi lebih stabil dan memiliki daya dukung yang memadai. Tanah yang mengandung air dalam jumlah tinggi, seperti tanah lempung jenuh, biasanya memiliki sifat plastis dan tidak stabil, yang dapat menyebabkan deformasi berlebih ketika digunakan sebagai lapisan dasar konstruksi. Oleh karena itu, pengurangan kadar air menjadi langkah awal penting untuk memperbaiki kondisi tanah dasar sebelum dilakukan pekerjaan lanjutan seperti pemadatan atau pelapisan.

Metode pengeringan dilakukan melalui dua pendekatan utama, yaitu drainase dan aerasi. Drainase dilakukan dengan menggali saluran di sekitar area kerja untuk mengalirkan air keluar dari tanah, baik secara gravitasi maupun dengan bantuan pompa. Pada area dengan genangan atau air tanah tinggi, pemasangan pipa drainase bawah tanah (*subsurface drainage*) menjadi solusi efektif untuk menurunkan muka air tanah. Sementara itu, aerasi dilakukan dengan membalik dan membiarkan tanah terpapar udara dan sinar matahari langsung, memungkinkan penguapan air secara alami. Proses ini biasanya dilakukan bersamaan dengan pencampuran tanah secara mekanis menggunakan grader atau harrow agar udara lebih cepat masuk ke dalam pori-pori tanah.

2. Metode Stabilisasi Tanah Kimia

Stabilisasi kimia dilakukan dengan menambahkan bahan kimia tertentu yang bereaksi dengan tanah untuk meningkatkan sifat mekanik dan kimia tanah. Beberapa bahan yang umum digunakan adalah:

a. Semen Portland

Penggunaan semen Portland sebagai bahan stabilisasi tanah merupakan metode kimia yang umum diterapkan untuk meningkatkan daya dukung dan kestabilan tanah, terutama pada proyek konstruksi jalan dan bangunan. Semen bekerja dengan cara bereaksi secara kimia dengan partikel tanah dan air dalam proses hidrasi, membentuk ikatan yang kuat dan menghasilkan matriks kaku yang menyatukan butiran tanah. Reaksi ini menyebabkan peningkatan signifikan pada kuat tekan dan ketahanan geser tanah, sehingga tanah yang awalnya bersifat lunak atau plastis menjadi lebih kaku dan stabil (Solihu, 2020).

Metode ini sangat efektif untuk tanah lempung dan silty clay yang memiliki kadar air tinggi dan karakteristik plastis. Proses aplikasinya diawali dengan pencampuran semen Portland ke dalam tanah yang telah diratakan, baik secara manual atau menggunakan alat pencampur mekanis seperti stabilizer atau grader. Setelah pencampuran merata, dilakukan pemadatan untuk memastikan ikatan antar partikel tanah dan semen terbentuk secara optimal. Biasanya, kadar pencampuran semen berkisar antara 5–12% dari berat kering tanah, tergantung pada jenis tanah dan hasil uji laboratorium. Setelah pemadatan, tanah dibiarkan selama beberapa hari agar proses hidrasi berlangsung sempurna.

b. Kapur (Lime)

Metode stabilisasi tanah menggunakan kapur (lime) merupakan salah satu teknik kimia yang efektif untuk memperbaiki sifat fisik dan mekanik tanah lempung. Kapur bekerja dengan cara bereaksi secara kimia dengan partikel tanah, khususnya tanah lempung, untuk mengurangi kadar plastisitas dan meningkatkan kekuatan tanah secara signifikan. Proses ini melibatkan reaksi kapur dengan air dan mineral dalam tanah yang menghasilkan ikatan baru, sehingga struktur tanah menjadi lebih stabil dan kurang mudah berubah bentuk akibat perubahan kadar air (Al-Swaidani *et al.*, 2016).

Penerapan kapur dalam stabilisasi tanah dimulai dengan pencampuran kapur dolomit atau kapur tohor ke dalam tanah yang akan distabilisasi, menggunakan alat mekanis seperti grader atau stabilizer. Campuran ini kemudian dipadatkan dan dibiarkan selama beberapa waktu agar reaksi kimia dapat berlangsung secara optimal. Kadar kapur yang digunakan biasanya berkisar antara 3% hingga 8% dari berat tanah kering, tergantung pada jenis tanah dan kondisi lapangan. Reaksi kimia ini tidak hanya menurunkan plastisitas tanah lempung, tetapi juga meningkatkan daya dukung dan mengurangi potensi susut atau pemuai tanah, sehingga sangat cocok untuk digunakan pada tanah dasar yang lunak dan tidak stabil.

c. *Fly Ash*

Metode stabilisasi tanah menggunakan *fly ash*, yaitu abu terbang hasil samping pembangkit listrik tenaga uap, semakin populer sebagai bahan alternatif dalam meningkatkan kualitas tanah dasar. *Fly ash* memiliki sifat pozzolanik, yaitu kemampuannya bereaksi dengan kalsium hidroksida membentuk senyawa yang memperkuat struktur tanah. Ketika dicampurkan dengan semen atau kapur, *fly ash* dapat meningkatkan kekuatan tekan dan kestabilan tanah secara signifikan. Selain itu, penggunaan *fly ash* juga mendukung prinsip keberlanjutan dengan memanfaatkan limbah industri yang berpotensi mencemari lingkungan jika tidak dikelola dengan baik (Mahedi *et al.*, 2020).

Proses stabilisasi dengan *fly ash* melibatkan pencampuran abu terbang secara merata ke dalam tanah dasar yang akan diperbaiki. Biasanya, *fly ash* dicampur bersama bahan pengikat lain seperti semen Portland atau kapur untuk memaksimalkan efek penguatan tanah. Komposisi campuran harus disesuaikan berdasarkan jenis tanah dan hasil uji laboratorium guna mendapatkan kestabilan optimal. Setelah pencampuran, tanah dipadatkan dan didiamkan selama waktu tertentu agar reaksi kimia dapat terjadi secara menyeluruh. Hasilnya adalah tanah yang memiliki struktur lebih padat, tahan terhadap perubahan kadar air, dan memiliki daya dukung lebih tinggi. Penggunaan *fly ash* dalam stabilisasi tanah juga memberikan keuntungan ekonomis dan lingkungan. Selain menekan biaya penggunaan

bahan kimia utama seperti semen, *fly ash* membantu mengurangi volume limbah industri yang harus dibuang.

d. Bitumen

Metode stabilisasi tanah menggunakan bitumen merupakan salah satu teknik yang efektif untuk meningkatkan daya tahan tanah dasar, terutama pada proyek konstruksi jalan dan perkerasan. Bitumen, yang merupakan bahan hidrokarbon hasil penyulingan minyak bumi, berfungsi sebagai pengikat yang memperkuat struktur tanah sekaligus mengurangi penyerapan air. Dengan sifat hidrofiliknya yang rendah, bitumen mampu menciptakan lapisan tahan air pada tanah, sehingga mengurangi risiko pelunakan dan kerusakan akibat kelembaban berlebih. Hal ini sangat penting untuk menjaga kestabilan tanah terutama di daerah dengan curah hujan tinggi atau kondisi tanah yang mudah tergenang (Jenkins, 2023).

Proses stabilisasi dengan bitumen melibatkan pencampuran bitumen cair atau emulsinya secara merata ke dalam tanah yang akan distabilisasi. Sebelum pencampuran, kondisi tanah biasanya dikeringkan dan dipersiapkan agar bitumen dapat melekat dengan optimal. Setelah dicampur, tanah yang mengandung bitumen dipadatkan untuk memastikan ikatan yang kuat antar partikel tanah dan bitumen. Teknik ini tidak hanya meningkatkan kekuatan geser tanah, tetapi juga memperbaiki ketahanan terhadap deformasi plastis dan retak, sehingga memperpanjang umur layanan perkerasan jalan.

3. Proses Pelaksanaan Stabilisasi Tanah

a. Persiapan Area Kerja

- 1) Pembersihan dan perataan area stabilisasi.
- 2) Pengeringan tanah jika kadar air terlalu tinggi.
- 3) Penentuan kedalaman dan luas area stabilisasi.

b. Pencampuran Bahan

- 1) Penambahan bahan stabilisasi sesuai dosis yang dianjurkan (misal 3-7% semen, 5-10% kapur, tergantung hasil uji).
- 2) Pencampuran tanah dan bahan stabilisasi menggunakan alat khusus seperti rotary mixer atau grader.
- 3) Penambahan air jika diperlukan untuk reaksi kimia yang optimal.

- c. Pemadatan
 - 1) Pemadatan lapisan campuran menggunakan alat pemadat berat seperti roller vibratory.
 - 2) Pemadatan dilakukan hingga mencapai nilai kepadatan kering maksimum dan kadar air optimum sesuai uji Proctor standar.
- d. Perawatan (Curing)
 - 1) Pemeliharaan kelembaban tanah selama beberapa hari untuk memastikan reaksi kimia berjalan sempurna, terutama pada stabilisasi semen dan kapur.
 - 2) Penghindaran lalu lintas berat pada area stabilisasi selama masa curing.

4. Evaluasi Kinerja Stabilisasi Tanah

Evaluasi dilakukan melalui beberapa parameter, antara lain:

- a. Uji Kuat Tekan Uniaxial (UCS): Untuk mengetahui peningkatan kekuatan tanah.
- b. Uji CBR: Untuk mengukur daya dukung tanah dasar setelah stabilisasi.
- c. Pengujian plastisitas (*Atterberg Limits*): Untuk menilai perubahan sifat plastis tanah.
- d. Pengujian permeabilitas: Untuk mengetahui perubahan sifat drainase tanah setelah stabilisasi.
- e. Pengujian umur pakai dan ketahanan terhadap siklus basah-kering atau pembekuan-pencairan.



BAB VI

TEKNIK PELAKSANAAN PERKERASAN LENTUR

Teknik pelaksanaan perkerasan lentur membahas secara komprehensif proses pembangunan lapisan-lapisan perkerasan jalan yang bersifat lentur, yaitu perkerasan yang mampu menyesuaikan diri terhadap beban kendaraan dengan deformasi elastis tanpa retak permanen. Perkerasan lentur umumnya terdiri dari beberapa lapisan material seperti subbase, *Base Course*, dan lapisan aspal yang diaplikasikan secara bertahap. Setiap lapisan memiliki fungsi spesifik untuk mendistribusikan beban dan memberikan kestabilan struktur agar dapat mendukung lalu lintas secara optimal. Pelaksanaan yang tepat sangat penting untuk menjaga kualitas dan ketahanan perkerasan sepanjang umur rencana.

A. Lapisan Pondasi Bawah dan Atas (Subbase dan *Base Course*)

Perkerasan lentur adalah salah satu tipe perkerasan jalan yang menggunakan campuran agregat dan binder aspal dengan kemampuan fleksibel menahan beban lalu lintas. Struktur perkerasan lentur terdiri atas beberapa lapisan, antara lain lapisan pondasi bawah (subbase) dan pondasi atas (*Base Course*), yang memiliki fungsi vital dalam mendukung lapisan perkerasan atas dan mendistribusikan beban ke tanah dasar (*Subgrade*). Kualitas lapisan pondasi sangat menentukan umur dan performa jalan (Qian *et al.*, 2019).

Lapisan subbase adalah lapisan pondasi bawah yang terletak langsung di atas tanah dasar (*Subgrade*). Lapisan ini berfungsi sebagai lapisan transisi yang memperbaiki kondisi tanah dasar, memberikan dukungan awal, mengurangi deformasi tanah *Subgrade*, serta sebagai lapisan pelindung agar tanah dasar tidak tercemar oleh agregat lapisan atas. Sementara itu, *Base Course* adalah lapisan pondasi atas yang

berfungsi sebagai penopang langsung bagi lapisan perkerasan lentur (lapisan aspal). *Base Course* harus memiliki kekuatan dan kestabilan yang cukup untuk menahan beban lalu lintas dan menyalurkannya ke lapisan subbase dan tanah dasar (Kumar & Singh, 2023).

1. Karakteristik Material Lapisan Subbase dan *Base Course*

Pemilihan material untuk subbase dan *Base Course* sangat penting dalam menjamin kualitas dan daya tahan perkerasan lentur.

a. Material Lapisan Subbase

Material yang umum digunakan untuk lapisan subbase adalah:

- 1) Material granular alami seperti pasir, kerikil, dan batu pecah dengan gradasi tertentu.
- 2) Material stabilisasi ringan yang dapat mengandung sedikit bahan pengikat (misal kapur, semen) jika diperlukan perbaikan kualitas.

Kriteria material subbase menurut AASHTO (2018) dan Kementerian PUPR (2021):

- 1) Gradasi butir yang memenuhi SNI atau AASHTO M145.
- 2) Nilai CBR minimal 20-30%.
- 3) Kadar lumpur, liat, dan debu (material halus) rendah ($<10\%$) untuk menghindari penurunan daya dukung.
- 4) Kuat tekan dan tahan aus cukup baik untuk mencegah deformasi.

b. Material Lapisan *Base Course*

Material *Base Course* harus memiliki kualitas lebih baik daripada subbase, seperti:

- 1) Agregat pecah (*crushed stone*) atau agregat alam yang berkualitas tinggi.
- 2) Stabilisasi dengan semen atau bahan lain apabila diperlukan.

Kriteria material *Base Course* (Kementerian PUPR, 2021):

- 1) Gradasi butir memenuhi spesifikasi lapisan pondasi jalan kelas A atau B.
- 2) Nilai CBR minimum 80%.
- 3) Kadar material halus dibatasi agar tidak melebihi 8-12%.
- 4) Memiliki indeks kepadatan dan kekerasan tinggi.

2. Metode Pelaksanaan Lapisan Subbase dan *Base Course*

a. Persiapan Lokasi

- 1) Pembersihan dan perataan area tanah dasar (*Subgrade*).

- 2) Pengujian kadar air dan densitas tanah dasar.
- 3) Perbaikan tanah dasar jika diperlukan (stabilisasi atau penggantian tanah).
- b. Pengadaan dan Penyebaran Material
 - 1) Material subbase dan *Base Course* diangkut ke lokasi dengan alat angkut sesuai kapasitas.
 - 2) Penyebaran dilakukan secara merata menggunakan motor grader atau alat penyebar lainnya.
 - 3) Ketebalan lapisan disesuaikan dengan perencanaan teknik (misal subbase 15-30 cm, *Base Course* 20-40 cm).
- c. Pengendalian Kadar Air
 - 1) Kadar air material diatur agar mendekati nilai optimum sesuai standar Proctor.
 - 2) Penyemprotan air atau pengeringan dilakukan untuk mencapai kadar air ideal sebelum pemadatan.
- d. Pemadatan
 - 1) Pemadatan dilakukan menggunakan roller berat (*vibratory roller* atau *pneumatic roller*).
 - 2) Pelaksanaan pemadatan secara berlapis, tiap lapis setebal 15-20 cm.
 - 3) Pemadatan dilanjutkan hingga mencapai nilai kepadatan maksimum ($\geq 95\%$ standar Proctor).
 - 4) Pengujian kepadatan dilakukan secara berkala menggunakan *nuclear density gauge* atau *sand cone test*.
- e. Pengujian Kualitas Material dan Pelaksanaan
 - 1) Uji laboratorium material untuk memenuhi spesifikasi (gradasi, CBR, kepadatan).
 - 2) Pengujian lapangan seperti uji kepadatan, tebal lapisan, dan kadar air secara rutin.
 - 3) Dokumentasi hasil uji sebagai bahan kontrol mutu.

3. Peran Lapisan Subbase dan *Base Course* dalam Struktur Perkerasan Lentur

Pada sistem struktur perkerasan lentur, peran lapisan subbase dan *Base Course* sangat krusial dalam memastikan kinerja jangka panjang jalan raya, terutama dalam menghadapi beban lalu lintas yang berulang. Kedua lapisan ini tidak hanya berfungsi sebagai penopang bagi lapisan aspal di atasnya, tetapi juga sebagai media untuk mendistribusikan beban

kendaraan ke lapisan tanah dasar secara merata. Tanpa dukungan lapisan yang kuat dan stabil di bawahnya, lapisan aspal berisiko mengalami deformasi plastis, retak dini, dan bahkan kerusakan struktural total dalam waktu singkat.

Lapisan subbase merupakan lapisan pertama di atas tanah dasar (*Subgrade*) dan biasanya terdiri dari material granular dengan kualitas sedang hingga tinggi. Fungsi utamanya adalah memperbaiki karakteristik tanah dasar yang lemah serta menahan tekanan awal dari beban kendaraan sebelum diteruskan ke *Base Course*. Selain itu, lapisan subbase juga berperan sebagai lapisan drainase tambahan yang membantu mengalirkan air keluar dari struktur perkerasan, mencegah akumulasi air yang dapat menyebabkan pelemahan daya dukung tanah dasar.

Lapisan *Base Course* memiliki peran yang lebih vital karena langsung berada di bawah lapisan perkerasan aspal. Material *Base Course* biasanya terdiri dari agregat bergradasi baik, seperti batu pecah yang dipadatkan dengan ketat. Tujuannya adalah untuk memberikan kekuatan utama pada struktur pondasi, memastikan stabilitas lapisan di atasnya, serta mengurangi tegangan yang diterima oleh lapisan subbase dan tanah dasar. Lapisan ini juga membantu menyebarkan beban dinamis dari kendaraan secara efisien, sehingga mengurangi potensi retak atau kerusakan struktural.

B. Pelaksanaan Lapisan Aspal

Lapisan aspal adalah komponen penting dalam struktur perkerasan lentur yang berfungsi menahan beban lalu lintas, menyalurkan beban ke lapisan pondasi, serta memberikan permukaan jalan yang halus dan tahan lama. Pelaksanaan lapisan aspal meliputi aplikasi *prime coat*, *tack coat*, dan *hot mix asphalt* (HMA) sebagai lapisan perkerasan utama. Setiap jenis lapisan ini memiliki peran, karakteristik, dan teknik pelaksanaan yang berbeda, namun saling melengkapi untuk membentuk struktur perkerasan yang kuat dan tahan lama (Kumar & Singh, 2023).

1. Definisi dan Fungsi Lapisan Aspal

a. *Prime Coat*

Prime coat adalah lapisan aspal cair yang diaplikasikan pada permukaan lapisan pondasi bawah (*subbase* atau *Base Course*) yang belum beraspal. Fungsinya adalah untuk:

- 1) Menyatukan partikel permukaan pondasi sehingga permukaan menjadi lebih keras dan stabil.
- 2) Mencegah penetrasi air ke lapisan pondasi.
- 3) Meningkatkan ikatan antara lapisan pondasi dengan lapisan aspal berikutnya.
- 4) Mengurangi debu dan partikel halus pada permukaan pondasi agar tidak mengganggu proses pemadatan.

b. *Tack Coat*

Tack coat adalah lapisan tipis aspal cair yang diaplikasikan antara dua lapisan aspal panas (HMA) atau antara *Base Course* yang sudah beraspal dengan lapisan aspal berikutnya. Fungsinya adalah:

- 1) Meningkatkan adhesi antar lapisan aspal agar tidak terjadi delaminasi atau pengelupasan.
- 2) Membentuk ikatan kohesif sehingga distribusi beban lebih efektif.
- 3) Menjaga kontinuitas struktural lapisan perkerasan lentur.

c. *Hot Mix Asphalt (HMA)*

HMA adalah campuran agregat dan aspal panas yang digunakan sebagai lapisan permukaan dan lapisan struktural perkerasan lentur. Campuran ini terdiri dari agregat kasar, halus, filler, dan aspal sebagai bahan pengikat yang dipanaskan dan dicampur sebelum diaplikasikan. HMA memiliki fungsi utama:

- 1) Menyediakan permukaan jalan yang halus dan tahan aus.
- 2) Menyalurkan beban lalu lintas ke lapisan pondasi bawah.
- 3) Menahan deformasi akibat beban dinamis dan siklus beban berulang.

2. Karakteristik Material Aspal untuk Lapisan *Prime*, *Tack*, dan *Hot Mix*

a. Aspal Cair (*Prime* dan *Tack Coat*)

Aspal cair yang digunakan untuk *prime* dan *tack coat* harus memenuhi standar kualitas tertentu, di antaranya:

- 1) Memiliki viskositas yang sesuai agar mudah meresap atau menempel di permukaan (ASTM D2027).
 - 2) Daya rekat yang tinggi untuk memastikan ikatan antar lapisan.
 - 3) Sifat tahan air dan tahan oksidasi agar tidak mudah rusak di lapangan.
- b. *Hot Mix Asphalt* (HMA)
- HMA harus memenuhi persyaratan teknis sesuai spesifikasi, seperti:
- 1) Kandungan aspal optimal (4-6% dari berat campuran) untuk mendapatkan keseimbangan antara kekuatan dan fleksibilitas.
 - 2) Gradasi agregat memenuhi standar SNI atau AASHTO untuk menghasilkan struktur kompak dan tahan lama.
 - 3) Indeks kepadatan yang tinggi (>95% Proctor) untuk meminimalisasi porositas dan kerusakan akibat air dan oksidasi.

3. Persiapan Pelaksanaan Lapisan Aspal

- a. Persiapan Permukaan
 - 1) Permukaan lapisan pondasi bawah (untuk *prime coat*) harus bersih, rata, dan bebas dari debu, lumpur, atau bahan lain yang dapat mengganggu adhesi.
 - 2) Permukaan lapisan aspal lama (untuk *tack coat*) harus kering dan bebas minyak atau kontaminan.
- b. Pengujian Kadar Air dan Temperatur
 - 1) Kadar air harus dikontrol agar tidak mengganggu adhesi aspal cair pada permukaan.
 - 2) Suhu aspal cair dan HMA harus dipantau sesuai standar pelaksanaan (misal *prime coat* pada 60–80°C, HMA pada 140–160°C).

4. Teknik Pelaksanaan Lapisan Aspal

- a. Pelaksanaan *Prime Coat*
 - 1) Aspal cair disemprotkan menggunakan alat penyemprot khusus (*sprayer truck*) dengan kecepatan dan dosis sesuai rekomendasi teknis (0,7 – 1,2 liter/m²).

- 2) Setelah aplikasi, permukaan dibiarkan kering selama 24 jam sebelum dilakukan penumpukan lapisan berikutnya.
 - 3) Perawatan dilakukan agar permukaan tidak rusak oleh kendaraan berat selama masa pengerasan.
- b. Pelaksanaan *Tack Coat*
- 1) Pengaplikasian dilakukan pada permukaan aspal lama atau *Base Course* yang sudah diaspal.
 - 2) Dosis aplikasi lebih rendah dari *prime coat*, sekitar 0,3 – 0,7 liter/m².
 - 3) Penyemprotan dilakukan secara merata untuk memastikan adhesi antar lapisan.
 - 4) Pelaksanaan dilakukan sesaat sebelum penghamparan HMA berikutnya agar lapisan tack tetap efektif.
- c. Penghamparan dan Pemadatan *Hot Mix Asphalt* (HMA)
- 1) HMA diangkut menggunakan dump truck dari pabrik pengolahan ke lokasi konstruksi.
 - 2) Penghamparan dilakukan dengan alat penghampar (paver) agar ketebalan dan kerapatan lapisan sesuai rencana.
 - 3) Pemadatan dilakukan dengan *roller vibratory* dan pneumatic roller untuk mencapai densitas optimal.
 - 4) Pengendalian suhu selama penghamparan dan pemadatan sangat penting untuk memastikan hasil yang maksimal.

5. Pengujian dan Kontrol Mutu Lapisan Aspal

Pengujian lapisan aspal dilakukan untuk memastikan kualitas dan ketahanan sesuai standar teknis. Beberapa pengujian penting meliputi:

- a. Pengujian Prime dan *Tack Coat*
 - 1) Pengujian viskositas dan penetrasi aspal cair.
 - 2) Pengujian daya rekat adhesi pada substrat.
 - 3) Pemeriksaan dosis aplikasi di lapangan.
- b. Pengujian *Hot Mix Asphalt*
 - 1) Uji kepadatan lapangan dengan *nuclear density gauge*.
 - 2) Uji ketebalan lapisan menggunakan pengukur ketebalan.
 - 3) Pengujian sampel HMA di laboratorium:
 - a) Uji Marshall untuk kekuatan dan stabilitas campuran.
 - b) Uji volumetrik seperti *voids in mineral aggregate* (VMA), *voids filled with asphalt* (VFA).

- c) Uji resistensi deformasi (*rutting test*) dan uji kelelahan (*fatigue test*).

C. Alat Berat yang Digunakan

Pelaksanaan perkerasan lentur memerlukan berbagai alat berat untuk menunjang efisiensi, kualitas, dan ketepatan proses konstruksi. Alat berat berfungsi mengolah bahan, menghamparkan, dan memadatkan lapisan-lapisan perkerasan agar memenuhi spesifikasi teknis dan daya tahan sesuai perencanaan. Penggunaan alat berat yang tepat sangat menentukan hasil akhir konstruksi perkerasan lentur.

1. Jenis-jenis Alat Berat dalam Pelaksanaan Perkerasan Lentur

Berikut adalah jenis alat berat utama yang digunakan dalam pelaksanaan perkerasan lentur:

a. Dump Truck

Dump truck berfungsi mengangkut bahan material seperti agregat, aspal panas (*hot mix asphalt*), serta material lain dari lokasi pengolahan ke lokasi konstruksi. Kecepatan dan kapasitas dump truck memengaruhi kecepatan penghamparan dan kestabilan suhu bahan.

- 1) Spesifikasi: Kapasitas angkut bervariasi antara 10 hingga 30 ton, dengan sistem pembuangan belakang (*rear dump*) atau sisi (*side dump*).
- 2) Peran penting: Memastikan pasokan material berkelanjutan dengan suhu sesuai, sehingga kualitas hot mix tetap terjaga selama penghamparan.

b. *Asphalt Paver* (Penghampar Aspal)

Alat ini berfungsi menghamparkan campuran aspal panas secara merata dan sesuai ketebalan yang direncanakan. Asphalt paver mengatur lebar dan ketebalan lapisan perkerasan dengan presisi.

- 1) Fungsi utama: Menghampar aspal panas pada permukaan pondasi atau lapisan bawah.
- 2) Fitur: Dilengkapi screed (alat pengatur ketebalan), sistem pengaturan lebar, serta kontrol suhu campuran.
- 3) Kapasitas: Mampu menghampar lebar antara 2,5 hingga 5 meter per lintasan.

c. *Roller* (Alat Pemadat)

Roller adalah alat berat yang digunakan untuk memadatkan lapisan perkerasan, baik agregat pondasi maupun campuran aspal panas. Terdapat berbagai jenis roller, seperti:

- 1) *Roller Vibratory* (Bergetar): Cocok untuk lapisan granular dan aspal, memberikan efek pemadatan mekanik dan getaran sehingga kepadatan optimal tercapai.
- 2) *Roller Pneumatic* (Ban Karet): Menghasilkan tekanan merata dan elastis pada permukaan, sering digunakan pada lapisan aspal untuk menghasilkan permukaan halus.
- 3) *Roller Static* (Tanpa Getaran): Digunakan untuk pemadatan lapisan pondasi bawah yang memerlukan tekanan konstan tanpa getaran.

2. Fungsi dan Proses Kerja Alat Berat dalam Pelaksanaan Perkerasan Lentur

a. Dump Truck dan Pengangkutan Material

Pada pelaksanaan konstruksi perkerasan lentur, dump truck memiliki fungsi vital sebagai alat transportasi utama untuk mengangkut material aspal atau agregat dari lokasi produksi ke area pekerjaan di lapangan. Kecepatan dan efisiensi dalam pengangkutan sangat menentukan keberhasilan tahapan selanjutnya, terutama saat mengangkut campuran aspal panas. Suhu campuran aspal harus tetap dijaga dalam rentang ideal, yaitu antara 140°C hingga 160°C. Penurunan suhu secara signifikan akan meningkatkan viskositas aspal, menyebabkan kesulitan saat proses penghamparan dan pemadatan, serta berpotensi menurunkan kualitas hasil akhir dari perkerasan jalan (Sabri, 2015).

Untuk menjamin kelancaran pengangkutan, dump truck yang digunakan harus dalam kondisi baik dan tertutup dengan terpal atau isolasi termal guna mencegah kehilangan panas selama perjalanan. Selain itu, pengemudi dump truck juga harus memiliki keterampilan dan pemahaman teknis yang memadai. Salah satu aspek penting adalah kemampuan dalam menjaga kestabilan muatan agar tidak tumpah saat berada di jalanan yang tidak rata atau saat menikung. Tumpahan material bukan hanya

merugikan dari sisi efisiensi, tetapi juga membahayakan pengguna jalan dan memperlambat ritme kerja di lapangan.

b. Asphalt Paver

Asphalt paver merupakan alat utama dalam proses penghamparan campuran aspal panas pada pekerjaan perkerasan lentur. Fungsi utamanya adalah menyebar dan meratakan aspal secara merata ke permukaan jalan sesuai dengan ketebalan dan lebar yang telah ditentukan dalam spesifikasi desain. Alat ini dilengkapi dengan screed, yaitu bagian belakang paver yang berfungsi untuk meratakan dan memberikan bentuk awal pada lapisan aspal yang dihampar. Operator asphalt paver harus mengatur posisi screed dengan sangat presisi, karena ketidaktepatan dalam pengaturan dapat mengakibatkan ketidaksesuaian dimensi lapisan aspal yang berujung pada penurunan kinerja jalan.

Proses penghamparan harus dilakukan dengan mempertahankan suhu campuran aspal pada kisaran ideal, umumnya antara 140°C hingga 160°C. Suhu yang terlalu rendah akan menyebabkan campuran mengeras sebelum proses pemadatan, sehingga menurunkan kualitas kepadatan dan daya ikat antar agregat. Selain suhu, kecepatan penghamparan yang stabil juga penting untuk menghindari variasi ketebalan lapisan. Asphalt paver yang bergerak terlalu cepat atau terlalu lambat dapat menghasilkan permukaan bergelombang, menyebabkan ketidakraturan tekstur dan menurunkan umur layanan perkerasan. Koordinasi antara laju paver dan suplai material dari dump truck harus berlangsung tanpa gangguan untuk menghindari jeda penghamparan. Jika penghamparan terganggu, maka sambungan dingin (*cold joint*) akan terbentuk dan berpotensi menjadi titik lemah di struktur jalan.

c. Roller (Pemadatan)

Roller atau alat pemadat memiliki peran penting dalam tahap akhir pelaksanaan perkerasan lentur, yaitu untuk memadatkan campuran aspal yang telah dihampar agar mencapai kepadatan yang sesuai standar teknis. Proses pemadatan harus dilakukan segera setelah penghamparan aspal, selagi campuran masih berada pada suhu optimal antara 120–140°C, karena pada suhu tersebut campuran masih plastis dan mudah dipadatkan tanpa

merusak struktur agregat atau menyebabkan retak. *Roller vibratory* (getar) biasanya digunakan pada tahap awal pemadatan untuk mengeluarkan udara dari campuran dan meningkatkan kontak antar butir agregat (Kumar & Singh, 2023).

Setelah pemadatan awal dengan roller getar, dilanjutkan dengan roller pneumatic (roda karet) yang berfungsi untuk “menyegele” permukaan dan meratakan tekstur akhir. Roller pneumatic memiliki tekanan yang merata karena roda karet dapat menyesuaikan bentuk permukaan, sehingga efektif untuk mengisi celah antar agregat dan mengurangi porositas. Kombinasi kedua jenis roller ini menghasilkan kepadatan maksimum dan kualitas permukaan jalan yang baik. Jika pemadatan dilakukan terlalu lambat, aspal akan mendingin dan menjadi kaku, sehingga tidak bisa dipadatkan dengan optimal dan berisiko retak dini.

3. Spesifikasi dan Kapasitas Alat Berat

Berikut tabel spesifikasi alat berat utama yang biasa digunakan dalam pelaksanaan perkerasan lentur:

Alat Berat	Kapasitas	Fungsi Utama	Catatan Teknis
Dump Truck	10-30 ton	Pengangkutan material	Perlu menjaga suhu dan volume
Asphalt Paver	Lebar 2.5-5 m	Penghampar aspal panas	Pengaturan screed kritis
Roller Vibratory	Berat 8-15 ton	Pemadatan aspal dan pondasi granular	Getaran untuk pemadatan efektif
Roller Pneumatic	Berat 5-12 ton	Pemadatan akhir lapisan aspal	Memberi finishing halus

4. Teknologi dan Inovasi dalam Alat Berat Konstruksi Perkerasan Lentur

Seiring perkembangan teknologi, alat berat konstruksi terus mengalami peningkatan fitur, seperti:

a. Sistem Kontrol Otomatis pada Asphalt Paver

Pada pelaksanaan konstruksi perkerasan lentur, teknologi sistem kontrol otomatis pada asphalt paver menjadi salah satu inovasi

penting yang mendukung peningkatan efisiensi dan kualitas hasil pekerjaan. Sistem ini memungkinkan pengaturan ketebalan dan lebar lapisan aspal secara otomatis dan real-time selama proses penghamparan. Sensor-sensor yang terpasang pada paver bekerja dengan mengumpulkan data dari permukaan dasar atau referensi elevasi, lalu mengatur ketinggian screed sesuai parameter desain. Dengan demikian, potensi kesalahan manual dapat diminimalkan dan permukaan jalan yang dihasilkan lebih rata dan sesuai spesifikasi teknis (Zhu *et al.*, 2018).

Kelebihan sistem kontrol otomatis ini juga terletak pada kemampuannya dalam menyesuaikan penghamparan terhadap kondisi lapangan yang dinamis. Misalnya, saat paver melewati area dengan elevasi dasar yang tidak seragam, sistem akan secara otomatis menyesuaikan tinggi screed untuk menjaga ketebalan lapisan tetap konstan. Penggunaan teknologi ini secara signifikan menurunkan variasi ketebalan lapisan aspal yang kerap menjadi penyebab retak atau deformasi prematur pada permukaan jalan. Selain itu, sistem ini juga mampu mengatur laju penghamparan secara konsisten sehingga kualitas pemadatan oleh roller selanjutnya menjadi lebih optimal.

b. *Roller* dengan Sensor Kepadatan dan Kelembaban

Penggunaan roller dengan sensor kepadatan dan kelembaban merupakan inovasi penting dalam teknologi alat berat untuk konstruksi perkerasan lentur. Alat ini dirancang untuk memberikan umpan balik secara langsung (real-time) kepada operator mengenai tingkat kepadatan tanah atau lapisan aspal serta kadar kelembaban yang terdeteksi selama proses pemadatan berlangsung. Data yang dikumpulkan oleh sensor ini ditampilkan melalui sistem monitor di kabin operator, sehingga proses pengambilan keputusan bisa dilakukan dengan cepat dan akurat. Teknologi ini mampu meningkatkan kontrol kualitas pemadatan dan mencegah terjadinya *under compaction* (pemadatan kurang) atau *over compaction* (pemadatan berlebih) yang dapat merusak struktur jalan (Wang *et al.*, 2024).

Sensor kepadatan yang digunakan pada roller ini bekerja dengan prinsip gelombang getar atau elektromagnetik untuk mendeteksi perubahan densitas material yang sedang dipadatkan. Sementara itu, sensor kelembaban membantu memastikan bahwa kadar air

berada dalam rentang ideal sebelum dan selama pemadatan dilakukan. Kombinasi kedua sensor ini sangat berguna terutama pada proyek yang menuntut spesifikasi teknis yang ketat dan konsistensi tinggi antar-lapisan konstruksi. Informasi yang dihasilkan tidak hanya meningkatkan kualitas pekerjaan lapangan, tetapi juga dapat direkam sebagai data dokumentasi teknis untuk audit mutu dan pelaporan proyek.

c. Dump Truck dengan Sistem Pemanas Container

Dump truck dengan sistem pemanas container merupakan inovasi penting dalam menunjang keberhasilan pelaksanaan konstruksi perkerasan lentur, khususnya dalam tahap pengangkutan campuran aspal panas. Sistem ini dirancang untuk menjaga suhu campuran aspal tetap berada pada rentang ideal (sekitar 140–160°C) selama perjalanan dari pabrik pencampur (*asphalt mixing plant*) ke lokasi pekerjaan. Jika suhu campuran menurun secara signifikan, viskositas aspal akan meningkat, sehingga proses penghamparan menjadi sulit dan kualitas pemadatan menurun. Penggunaan sistem pemanas container mampu mempertahankan konsistensi suhu aspal dan mengurangi risiko pendinginan prematur yang berujung pada penurunan mutu jalan (Syuhada *et al.*, 2019).

Sistem pemanas yang diterapkan pada dump truck biasanya menggunakan elemen pemanas berbasis bahan bakar atau listrik yang ditempatkan di dinding atau dasar kontainer. Beberapa desain juga menerapkan pelapisan insulasi termal yang mencegah kehilangan panas selama perjalanan. Selain menjaga suhu, sistem ini juga menghindari terjadinya penggumpalan atau pengerasan dini aspal di dalam bak truk, yang jika terjadi dapat menyebabkan pencampuran tidak merata dan lapisan jalan yang tidak seragam. Teknologi ini sangat penting terutama pada proyek di daerah yang berjarak jauh dari asphalt mixing plant atau memiliki kondisi cuaca dingin yang ekstrem.

5. Faktor Keselamatan dan Perawatan Alat Berat

Penggunaan alat berat harus memperhatikan aspek keselamatan kerja, termasuk:

- a. Pengoperasian oleh operator terlatih dan bersertifikat.
- b. Pemeriksaan rutin kondisi alat untuk mencegah kerusakan dan kecelakaan.
- c. Penggunaan alat pelindung diri (APD) oleh seluruh pekerja di area kerja alat berat.
- d. Perawatan berkala, termasuk penggantian suku cadang dan pelumasan, agar alat selalu dalam kondisi prima.

D. Pengujian Mutu Lapangan

Pengujian mutu lapangan merupakan bagian penting dalam proses konstruksi perkerasan lentur yang bertujuan menjamin kualitas dan kesesuaian lapisan perkerasan dengan spesifikasi teknis. Pengujian ini meliputi pengukuran kepadatan, ketebalan, dan gradasi material di lapangan yang berfungsi untuk memastikan daya dukung, ketahanan, dan umur perkerasan sesuai rancangan. Pengujian mutu lapangan harus dilakukan secara sistematis dan berkelanjutan agar potensi kegagalan konstruksi seperti deformasi, retak, dan kerusakan prematur dapat diminimalisasi (Kumar & Singh, 2023).

1. Pengujian Kepadatan Lapangan

Kepadatan material perkerasan adalah parameter krusial yang mempengaruhi kekuatan, stabilitas, dan daya tahan jalan. Kepadatan rendah dapat menyebabkan permeabilitas tinggi sehingga air mudah masuk, mempercepat kerusakan perkerasan (Dzhabrailov *et al.*, 2019). Pengujian kepadatan lapangan bertujuan memastikan material padat sesuai dengan nilai kepadatan maksimal (*Maximum Dry Density*, MDD) yang diperoleh dari uji laboratorium (uji Proctor). Kepadatan optimum (*Optimum Moisture Content*, OMC) juga diperiksa agar pemadatan optimal tercapai.

Ada beberapa metode pengujian kepadatan yang umum digunakan di lapangan, yaitu:

- a. Metode *Sand Cone* (Kerucut Pasir)

Metode *Sand Cone* (Kerucut Pasir) merupakan salah satu teknik tradisional yang masih banyak digunakan dalam pengujian

kepadatan tanah di lapangan. Prinsip dasar dari metode ini adalah dengan mengukur volume lubang yang telah diisi pasir standar, yang memiliki gradasi dan kepadatan tertentu. Proses ini dimulai dengan membuat lubang kecil pada permukaan tanah yang telah dipadatkan. Lubang tersebut kemudian diisi dengan pasir dari alat *sand cone* sampai penuh, dan berat pasir yang digunakan dicatat untuk menentukan volume lubang. Di sisi lain, tanah yang diambil dari lubang juga ditimbang untuk menentukan massa dan kadar airnya. Dengan data tersebut, maka kepadatan kering tanah dapat dihitung dan dibandingkan dengan nilai standar yang diinginkan (Kumar & Singh, 2023).

b. Metode *Nuclear Density Gauge* (NDG)

Metode *Nuclear Density Gauge* (NDG) merupakan teknologi canggih dalam pengujian kepadatan lapangan yang menggunakan prinsip radiasi gamma untuk mengukur kepadatan dan kadar air tanah secara langsung dan non-destruktif. Alat ini bekerja dengan memancarkan sinar gamma dari sumber radioaktif ke dalam tanah, kemudian mendeteksi jumlah radiasi yang dipantulkan atau diserap oleh tanah. Berdasarkan interaksi ini, NDG mampu menghitung nilai kepadatan basah, kadar air, dan kepadatan kering tanah secara otomatis. Metode ini dinilai sangat efisien, terutama untuk proyek konstruksi berskala besar yang membutuhkan data cepat dan akurat dalam jumlah banyak.

c. Metode *Sand Replacement Digital*

Metode *Sand Replacement Digital* merupakan pengembangan dari metode kerucut pasir konvensional yang dirancang untuk meningkatkan efisiensi dan akurasi dalam pengujian kepadatan tanah di lapangan. Metode ini tetap menggunakan prinsip penggantian volume tanah dengan pasir, namun perbedaannya terletak pada penerapan teknologi digital dalam pengukuran volume. Sensor digital digunakan untuk mengukur volume pasir yang masuk ke dalam lubang, sehingga hasil perhitungan menjadi lebih presisi dan mengurangi kemungkinan kesalahan manusia (Wang *et al.*, 2024). Inovasi ini sangat membantu terutama dalam proyek-proyek yang membutuhkan pengujian cepat dan hasil yang konsisten.

2. Pengujian Ketebalan Lapangan

Ketebalan lapisan perkerasan sangat menentukan kemampuan struktur menahan beban lalu lintas dan tekanan lingkungan. Ketebalan yang kurang dari rancangan dapat menyebabkan kegagalan struktural lebih cepat (Liu *et al.*, 2019). Metode pengukuran ketebalan:

a. Pengukuran Manual dengan Alat Ukur Ketebalan

Pengukuran ketebalan lapangan secara manual dengan alat ukur ketebalan melalui metode pengambilan contoh bor inti (*core sample*) merupakan salah satu metode yang umum digunakan dalam proyek jalan, khususnya untuk mengevaluasi ketebalan lapisan aspal atau beton. Prosedur ini melibatkan pengeboran langsung pada permukaan jalan menggunakan mesin bor inti berintan, kemudian sampel silinder yang diambil dianalisis di laboratorium untuk menentukan ketebalannya secara presisi. Metode ini dianggap sebagai salah satu teknik paling akurat karena memberikan gambaran nyata mengenai struktur lapisan yang telah dipadatkan.

b. Metode Ultrasonik

Metode ultrasonik untuk pengujian ketebalan lapangan merupakan teknik non-destruktif yang menggunakan gelombang suara berfrekuensi tinggi untuk mengukur ketebalan lapisan perkerasan, seperti aspal atau beton. Prinsip kerjanya adalah dengan mengirimkan gelombang ultrasonik melalui permukaan material, lalu mengukur waktu tempuh gelombang yang dipantulkan kembali oleh batas bawah lapisan. Dengan mengetahui kecepatan gelombang dalam material tertentu, maka ketebalan lapisan dapat dihitung secara akurat. Teknik ini sangat berguna untuk evaluasi cepat dan efisien tanpa merusak struktur jalan yang sedang diuji.

c. Metode Radar Penetrasi Tanah (*Ground Penetrating Radar - GPR*)

Metode Radar Penetrasi Tanah atau *Ground Penetrating Radar* (GPR) merupakan teknik non-destruktif yang digunakan untuk mengukur ketebalan berbagai lapisan perkerasan secara cepat dan akurat. Prinsip kerjanya adalah dengan mengirimkan gelombang elektromagnetik frekuensi tinggi ke dalam tanah atau struktur jalan. Gelombang tersebut akan dipantulkan kembali ke permukaan saat mengenai batas antar lapisan material yang

memiliki kontras dielektrik berbeda. Waktu tempuh gelombang pantul ini kemudian digunakan untuk menghitung ketebalan tiap lapisan, seperti lapisan aspal, *Base Course*, dan subbase secara simultan.

3. Pengujian Gradasi Material Lapangan

Gradasi butir material menentukan karakteristik kekuatan, stabilitas, dan permeabilitas lapisan perkerasan. Pengujian gradasi memastikan bahwa distribusi ukuran butir memenuhi spesifikasi teknis sehingga struktur jalan memiliki kekuatan optimal dan drainase yang baik (Kumar & Singh, 2023). Metode yang umum digunakan adalah analisis saringan (*sieve analysis*), di mana contoh material dari lapangan dikeringkan terlebih dahulu, lalu disaring menggunakan serangkaian ayakan dengan ukuran lubang yang telah ditetapkan berdasarkan standar (misalnya ASTM atau SNI). Setiap ukuran ayakan memisahkan partikel berdasarkan diameter, sehingga memungkinkan analisis distribusi ukuran butir secara kuantitatif.

Prosedur pengujian gradasi dimulai dengan pengambilan sampel representatif dari lokasi lapangan. Sampel kemudian dikeringkan di oven untuk menghilangkan kelembaban, sebelum ditimbang dan diuji dengan menyaring melalui rangkaian ayakan bertingkat, mulai dari ukuran terbesar di atas hingga terkecil di bawah. Setelah proses penyaringan, berat agregat yang tertahan di setiap ayakan dicatat dan digunakan untuk menghitung persentase kumulatif lolos. Hasil analisis ini kemudian diplot dalam grafik semi-logaritmik, menghasilkan kurva gradasi yang menunjukkan distribusi ukuran partikel dalam campuran agregat. Informasi dari pengujian gradasi sangat penting dalam menentukan apakah material memenuhi spesifikasi teknis yang diharapkan untuk kekuatan, kestabilan, dan drainase. Gradasi yang baik umumnya menunjukkan distribusi partikel yang seragam dari ukuran besar hingga kecil, memungkinkan kepadatan optimal dan minimnya rongga antar butiran.

Setiap lapisan perkerasan memiliki spesifikasi gradasi yang berbeda sesuai jenis materialnya:

- a. Lapisan pondasi granular: Harus memenuhi rentang gradasi tertentu untuk memastikan stabilitas (SNI 03-6829-2002).
- b. Lapisan aspal: Gradasi agregat harus sesuai standar campuran hot mix untuk menjaga kekuatan dan keawetan.

Gradasi yang tidak sesuai dapat menyebabkan material kurang stabil, mudah bergerak, dan mengakibatkan deformasi jalan. Jika ditemukan penyimpangan gradasi, material harus diganti atau dicampur ulang sebelum dipakai.



BAB VII

TEKNIK PELAKSANAAN PERKERASAN KAKU

Teknik pelaksanaan perkerasan kaku yang merupakan salah satu metode konstruksi jalan dengan menggunakan beton sebagai material utama. Perkerasan kaku memiliki karakteristik kekuatan tekan tinggi dan ketahanan terhadap deformasi permanen, sehingga sangat cocok untuk jalan dengan beban lalu lintas berat dan umur layanan yang panjang. Pada bab ini, fokus utama adalah pada proses pelaksanaan mulai dari persiapan area kerja, pengecoran beton, hingga tahap akhir finishing dan curing yang sangat menentukan kualitas perkerasan. Teknik pelaksanaan yang tepat akan menjamin mutu dan daya tahan perkerasan kaku sesuai standar yang berlaku.

Pelaksanaan perkerasan kaku mencakup beberapa tahap penting, seperti pemasangan bekisting, penguatan dengan tulangan baja jika diperlukan, dan pengecoran beton yang harus memenuhi spesifikasi teknis beton struktural. Penggunaan tulangan berfungsi untuk menahan tegangan tarik dan mencegah retak pada pelat beton. Selain itu, aspek penting lainnya adalah penerapan sistem sambungan (*expansion* dan *contraction joint*) yang berfungsi mengakomodasi perubahan panjang beton akibat perubahan suhu dan mencegah kerusakan akibat regangan internal. Tahapan finishing permukaan juga menentukan tekstur akhir dan kemampuan drainase permukaan jalan.

A. Konstruksi Pelat Beton

Perkerasan kaku menggunakan pelat beton bertulang atau tidak bertulang sebagai struktur utama yang menahan beban lalu lintas. Konstruksi pelat beton merupakan salah satu metode perkerasan jalan yang banyak diterapkan untuk jalan dengan intensitas lalu lintas tinggi dan beban berat, seperti jalan tol, jalan nasional, dan area industri.

Keunggulan pelat beton terletak pada kekuatan tekan yang tinggi, daya tahan lama, dan kemampuan menyebarkan beban secara merata ke tanah dasar. Namun, pelaksanaan konstruksi pelat beton memerlukan perhatian khusus pada proses pengecoran dan curing untuk mencegah keretakan dan memastikan mutu beton sesuai dengan standar.

1. Persiapan Lahan dan Dasar Pelat Beton

a. Pembersihan dan Perataan

Pembersihan dan perataan lahan merupakan tahap awal yang sangat krusial dalam persiapan pelat beton, karena memengaruhi stabilitas dan daya tahan struktur secara keseluruhan. Langkah pertama adalah membersihkan area kerja dari semua material asing seperti batu, kayu, akar, vegetasi, atau sampah konstruksi yang dapat menyebabkan ketidakrataan permukaan atau mengganggu interaksi antara pelat beton dan tanah dasar. Pembersihan ini dilakukan secara manual atau menggunakan alat berat tergantung pada skala proyek dan kondisi lahan. Material yang tertinggal dapat menciptakan rongga atau titik lemah yang menyebabkan retak dini pada pelat.

Setelah area bersih, proses perataan dimulai dengan meratakan tanah dasar agar sesuai dengan elevasi dan kemiringan yang ditentukan dalam gambar desain. Perataan harus dilakukan dengan hati-hati menggunakan grader atau alat bantu lain seperti waterpass atau theodolite untuk memastikan elevasi sesuai dan tidak ada cekungan. Permukaan tanah dasar harus cukup padat dan rata agar pelat beton memiliki ketebalan seragam, yang sangat penting untuk menahan beban secara merata dan mencegah deformasi lokal. Ketidaksesuaian dalam ketinggian dapat menyebabkan penurunan daya dukung dan kerusakan struktural dini.

b. Pemasangan Pondasi Dasar

Pemasangan pondasi dasar merupakan langkah penting dalam persiapan pelat beton, karena menjadi elemen pendukung utama terhadap beban struktur di atasnya. Pondasi dasar biasanya terdiri dari lapisan granular seperti subbase dan *Base Course* yang berfungsi untuk menyebarkan beban, meningkatkan kestabilan tanah dasar, dan mencegah deformasi struktural. Material granular tersebut harus memiliki gradasi yang baik dan dipilih

sesuai dengan standar teknik yang berlaku. Proses pemasangan dilakukan berlapis-lapis dengan ketebalan tertentu yang dihampar dan dipadatkan secara bertahap agar tercapai kepadatan optimal di setiap lapisan (Delatte, 2017).

Kepadatan pondasi sangat menentukan kinerja pelat beton di atasnya. Oleh karena itu, proses pemadatan dilakukan menggunakan alat berat seperti *roller vibratory* atau *pneumatic roller*, dan diuji menggunakan metode *sand cone* atau *nuclear density gauge* (NDG) untuk memastikan bahwa nilai kepadatan telah memenuhi persyaratan desain. Pondasi yang dipadatkan dengan baik akan memiliki daya dukung tinggi, mengurangi risiko penurunan (*settlement*), serta mampu menahan gaya lateral dan vertikal dari beban kendaraan atau struktur bangunan. Spesifikasi gradasi material juga harus sesuai agar tidak terjadi segregasi atau pemampatan diferensial yang dapat merusak integritas pelat beton. Jika pondasi tidak dipasang dan dipadatkan dengan benar, dapat terjadi differential settlement atau penurunan tidak merata pada pelat beton.

2. Material Beton untuk Pelat Perkerasan

a. Komposisi Beton

Beton untuk perkerasan kaku umumnya menggunakan campuran semen Portland (*Portland Cement Concrete* - PCC) dengan agregat kasar dan halus, air, dan admixtures bila perlu. Proporsi bahan dirancang agar memenuhi kekuatan tekan minimum (biasanya ≥ 30 MPa pada usia 28 hari) dan ketahanan terhadap siklus beku-cair (ACI, 2019).

b. Kualitas Bahan Baku

- 1) Semen: Harus memenuhi standar SNI 15-2049-2004 dengan sifat hidrasi dan pengerasan optimal.
- 2) Agregat: Harus bersih, keras, dan tahan aus. Gradasi agregat harus sesuai spesifikasi untuk memastikan beton homogen dan padat.
- 3) Air: Bersih, bebas dari bahan organik dan kotoran.
- 4) *Admixtures*: Dapat digunakan untuk mempercepat pengerasan, mengurangi air, atau meningkatkan *workability*.

3. Perancangan Campuran Beton

Perancangan campuran beton merupakan langkah kritis dalam proses konstruksi yang bertujuan menghasilkan beton dengan kualitas sesuai kebutuhan teknis, yaitu kekuatan tekan, kemudahan pengerjaan (*workability*), dan ketahanan terhadap lingkungan (*durabilitas*). Beton untuk keperluan perkerasan jalan memerlukan kekuatan dan daya tahan tinggi karena harus mampu menahan beban lalu lintas yang berulang dan kondisi cuaca ekstrem. Oleh karena itu, proses perancangannya harus mengacu pada metode yang telah terbukti, seperti metode *American Concrete Institute* (ACI) atau Standar Nasional Indonesia (SNI).

Salah satu parameter kunci dalam perancangan campuran beton adalah perbandingan antara air dan semen, yang dikenal sebagai *water-cement ratio* (w/c ratio). Rasio ini sangat menentukan sifat mekanik beton. Semakin rendah nilai w/c, semakin tinggi kekuatan tekan beton, namun *workability*-nya akan menurun. Sebaliknya, w/c yang terlalu tinggi akan menghasilkan beton yang mudah dikerjakan tetapi kekuatannya rendah dan berpori, sehingga mudah terdegradasi oleh air, bahan kimia, atau siklus beku-cair. Untuk beton perkerasan jalan, nilai w/c ideal berkisar antara 0,4 sampai 0,5, karena memberikan kombinasi optimal antara kekuatan struktural dan ketahanan jangka panjang (Neville, 2011).

Pemilihan material penyusun lainnya juga perlu diperhatikan secara cermat, termasuk jenis dan ukuran agregat, jenis semen, serta bahan tambahan (*admixture*) jika diperlukan. Agregat kasar dan halus harus memiliki gradasi yang baik agar beton memiliki kerapatan tinggi dan minim rongga udara. Bahan tambahan seperti *plasticizer* atau retarder dapat ditambahkan untuk meningkatkan *workability* tanpa menambah air, atau untuk memperlambat proses pengikatan saat pengecoran dalam cuaca panas. Setelah rancangan campuran ditentukan, pengujian *trial mix* dilakukan di laboratorium untuk memastikan bahwa beton hasil campuran memenuhi kriteria desain yang ditetapkan. Hasil uji kuat tekan pada umur 7 dan 28 hari menjadi indikator utama kualitas beton. Jika hasil uji belum sesuai, maka dilakukan penyesuaian rasio atau bahan.

4. Proses Pengecoran Pelat Beton

a. Pemasangan Bekisting (*Formwork*)

Pemasangan bekisting atau *formwork* merupakan tahap awal yang sangat penting dalam proses pengecoran pelat beton. Fungsi utama bekisting adalah menahan beton segar agar tetap berada pada bentuk dan ukuran yang telah dirancang sesuai gambar kerja. Material yang digunakan untuk bekisting harus cukup kuat untuk menahan beban berat beton cair, serta kedap agar tidak terjadi kebocoran atau rembesan yang dapat mengurangi kualitas permukaan beton. Bekisting yang tidak kuat atau bocor berpotensi menyebabkan beton kehilangan air dan campuran bahan sehingga berpengaruh buruk pada kekuatan dan daya tahan pelat beton.

Bekisting harus dipasang dengan sangat presisi agar permukaan pelat beton menjadi rata dan halus sesuai spesifikasi desain. Pemasangan bekisting yang tidak rata atau bergeser selama pengecoran dapat mengakibatkan ketebalan pelat beton menjadi tidak merata, yang berisiko menimbulkan titik lemah dan retak pada pelat beton. Oleh karena itu, pemasangan bekisting harus dilakukan dengan pengukuran yang teliti dan penguncian yang kokoh agar tidak terjadi pergeseran selama proses pengecoran berlangsung.

b. Pemasangan Tulangan

Pemasangan tulangan baja pada pelat beton bertulang merupakan tahap krusial yang menentukan kekuatan dan daya tahan struktur terhadap beban yang bekerja, terutama beban lalu lintas. Tulangan berfungsi menahan tegangan tarik yang tidak mampu ditahan oleh beton itu sendiri, sehingga penempatan tulangan harus dilakukan secara tepat sesuai dengan gambar desain teknik. Ketepatan posisi dan kerapatan tulangan sangat penting agar beban dapat didistribusikan secara merata dan mencegah terjadinya retak atau kegagalan struktural pada pelat beton (Delatte, 2017).

Baja tulangan yang digunakan biasanya berupa baja polos atau baja ulir dengan diameter dan jarak antar batang yang telah dihitung berdasarkan kebutuhan struktur. Baja ulir sering dipilih karena permukaan yang bergelombang dapat meningkatkan ikatan antara baja dan beton, sehingga kekuatan gabungan

keduanya lebih optimal. Pemasangan tulangan dilakukan dengan hati-hati agar tidak bergeser selama proses pengecoran beton, biasanya dengan menggunakan spacer atau penyangga agar tulangan tetap pada posisi elevasi yang tepat di dalam bekisting.

c. Pengecoran Beton

Pengecoran beton merupakan tahap penting dalam proses pembuatan pelat beton, di mana beton segar dituangkan secara merata ke dalam bekisting yang telah dipersiapkan sebelumnya. Agar kualitas beton yang dihasilkan optimal, pengecoran harus dilakukan secara berkelanjutan atau continuous. Hal ini bertujuan untuk mencegah terbentuknya sambungan dingin (*cold joint*), yaitu kondisi di mana beton yang baru dicor tidak menyatu sempurna dengan beton yang sudah mengeras sebelumnya. Sambungan dingin ini dapat menjadi titik lemah yang menurunkan kekuatan dan daya tahan struktural pelat beton.

Proses pengecoran juga harus memperhatikan distribusi beton agar merata di seluruh permukaan bekisting. Penggunaan alat bantu seperti vibrator internal menjadi sangat krusial dalam tahap ini. Vibrator internal berfungsi untuk menghilangkan rongga udara yang terperangkap di dalam beton segar. Kehadiran rongga udara dapat menurunkan kepadatan dan kekuatan beton, sehingga pemadatan menggunakan vibrator memastikan beton menjadi padat dan homogen. Beton yang padat dan bebas rongga udara akan memiliki kualitas yang lebih baik, tahan lama, dan mampu menahan beban sesuai dengan desain struktur. Proses pengecoran juga perlu dikontrol dengan baik, termasuk kecepatan pengecoran dan suhu beton agar tidak terjadi segregasi atau pemisahan bahan campuran. Pelaksanaan pengecoran yang benar akan menghasilkan pelat beton dengan permukaan halus, kuat, dan bebas dari cacat struktural.

d. Penyelesaian Permukaan

Tahap berikutnya adalah penyelesaian permukaan beton. Proses ini sangat penting untuk memastikan permukaan pelat beton menjadi rata, halus, dan sesuai dengan spesifikasi desain yang telah ditetapkan. Penyelesaian permukaan biasanya dilakukan dengan alat finishing seperti screed dan trowel. Screed digunakan untuk meratakan permukaan beton secara kasar dengan cara menggeser alat tersebut sepanjang bekisting untuk

menghilangkan kelebihan beton dan mengisi kekurangan, sehingga tercapai ketebalan yang seragam.

Tahap selanjutnya adalah pemolesan menggunakan trowel. Proses troweling bertujuan untuk menghasilkan permukaan yang halus dan padat, sehingga mengurangi porositas beton dan meningkatkan kekuatan permukaan. Pada beberapa kasus, permukaan beton juga diberi tekstur khusus seperti garis-garis atau pola kasar yang berfungsi untuk meningkatkan daya gesek antara permukaan beton dan ban kendaraan. Tekstur ini sangat penting terutama pada jalan yang rawan licin akibat air hujan atau kondisi basah, sehingga dapat meningkatkan keselamatan pengguna jalan.

B. Perkuatan dengan Tulangan

Perkuatan dengan tulangan pada perkerasan kaku merupakan salah satu solusi teknis yang digunakan untuk meningkatkan kapasitas struktural pelat beton serta mengendalikan keretakan akibat tegangan tarik dan beban siklik. Tulangan baja yang tertanam dalam pelat beton berfungsi sebagai elemen tarik yang mampu menahan gaya-gaya tarik yang terjadi akibat beban lalu lintas dan perubahan suhu (Neville, 2011). Tidak semua perkerasan kaku memerlukan tulangan; perkerasan beton tanpa tulangan (*plain concrete pavement*) sering digunakan pada kondisi beban ringan sampai sedang. Namun, pada perkerasan yang menanggung beban berat, lalu lintas padat, atau kondisi tanah dasar kurang baik, tulangan sangat direkomendasikan untuk menjamin kinerja jangka panjang.

1. Fungsi Tulangan pada Perkerasan Kaku

a. Mengontrol Retak

Beton dikenal memiliki kekuatan tekan yang sangat baik, namun memiliki kelemahan pada kemampuan menahan tegangan tarik. Dalam struktur perkerasan kaku, berbagai faktor seperti penyusutan beton (*shrinkage*), perubahan suhu lingkungan, dan beban lalu lintas dapat menimbulkan tegangan tarik yang menyebabkan munculnya retak pada pelat beton. Retak-retak ini jika dibiarkan berkembang dapat mengurangi kekuatan dan daya

tahan struktur secara keseluruhan, bahkan berpotensi menimbulkan kerusakan yang lebih serius.

Tulangan baja pada perkerasan kaku berperan penting dalam mengontrol munculnya retak tersebut. Tulangan bertindak sebagai pengikat dan menahan tegangan tarik yang terjadi, sehingga meskipun retak muncul, ukurannya tetap kecil dan terkendali. Dengan demikian, tulangan membantu mempertahankan integritas struktural pelat beton dan memperpanjang umur pakainya. Fungsi ini sangat penting agar perkerasan kaku tetap dapat berfungsi dengan baik tanpa mengalami kegagalan dini akibat keretakan yang meluas.

b. Menambah Kapasitas Lentur

Tulangan pada perkerasan kaku berfungsi meningkatkan kapasitas lentur pelat beton, yang sangat krusial terutama pada jalan dengan beban lalu lintas berat seperti truk dan kendaraan besar lainnya. Beton sendiri memiliki kekuatan tekan yang tinggi, namun kekuatan lenturnya relatif rendah. Dengan penambahan tulangan baja, pelat beton menjadi mampu menahan tegangan tarik akibat beban lentur yang bekerja pada permukaannya. Hal ini membantu mencegah terjadinya patah atau retak yang dapat mempercepat kerusakan jalan.

Kapasitas lentur yang lebih baik ini memungkinkan perkerasan kaku menahan beban berulang dalam frekuensi tinggi tanpa mengalami kerusakan struktural yang serius. Dengan kata lain, tulangan memberikan daya tahan tambahan sehingga pelat beton dapat mempertahankan kestabilan dan fungsinya dalam jangka waktu lebih lama.

c. Menyediakan Sambungan Internal

Tulangan pada perkerasan kaku tidak hanya berfungsi untuk mengontrol retak dan menambah kapasitas lentur, tetapi juga sangat penting dalam menyediakan sambungan internal antar pelat beton. Sambungan ini berperan mengikat pelat-pelat beton satu sama lain sehingga beban lalu lintas yang diterima dapat tersebar secara merata di antara pelat-pelat tersebut. Dengan adanya tulangan sebagai pengikat internal, pergerakan sambungan yang berlebihan dapat dicegah, sehingga mengurangi risiko kerusakan seperti retak atau pergeseran pelat.

Sambungan internal yang kuat berkontribusi pada kestabilan keseluruhan struktur perkerasan kaku. Ketika pelat-pelat beton saling terhubung dengan baik melalui tulangan, maka sistem perkerasan akan bekerja secara harmonis dalam menahan beban, memperpanjang umur layanan jalan, dan mengurangi kebutuhan perbaikan.

2. Jenis Tulangan yang Digunakan

a. Tulangan Baja Polos

Tulangan baja polos adalah jenis tulangan dengan permukaan halus yang umum digunakan dalam konstruksi pelat beton bertulang, terutama untuk kebutuhan standar. Karena permukaannya yang rata, tulangan ini lebih mudah diproduksi dan biasanya lebih ekonomis dibandingkan dengan jenis tulangan lainnya. Penggunaan tulangan polos sering diterapkan pada struktur yang tidak memerlukan kekuatan lekat ekstra antara beton dan tulangan. Namun, kelemahan utama dari tulangan baja polos terletak pada daya lekatnya yang lebih rendah terhadap beton. Hal ini meningkatkan risiko terjadinya slip atau pergeseran tulangan ketika beton mengalami beban tarik atau regangan. Akibatnya, sambungan antara tulangan dan beton menjadi kurang efektif dalam menahan beban, sehingga desain struktur harus mempertimbangkan potensi pergeseran ini agar keamanan dan kekuatan pelat beton tetap terjaga.

b. Tulangan Baja Ulir (*Deformed Bars*)

Tulangan baja ulir atau *deformed bars* adalah jenis tulangan yang memiliki permukaan bergerigi atau bertekstur khusus, yang dirancang untuk meningkatkan daya lekat dengan beton. Permukaan bergerigi ini memungkinkan beton lebih kuat melekat pada tulangan, sehingga transfer tegangan tarik antara beton dan baja menjadi lebih efektif. Dengan daya lekat yang lebih baik, tulangan baja ulir dapat meminimalkan risiko pergeseran atau slip yang sering terjadi pada tulangan polos.

c. Jaring *Welded Wire Mesh* (WWM)

Jaring *Welded Wire Mesh* (WWM) adalah jenis tulangan yang terdiri dari anyaman kawat baja yang disambung secara las pada setiap titik pertemuan. Struktur anyaman ini memberikan kekuatan yang merata dan mendistribusikan beban secara efektif

di seluruh permukaan beton. WWM biasanya digunakan pada pelat beton bertulang yang memiliki ketebalan tipis atau sebagai lapisan *overlay* pada perkerasan kaku untuk memperkuat pengendalian retak (Delatte, 2017).

d. *Fiber Reinforcement*

Fiber Reinforcement, baik berupa serat sintetis maupun serat baja (steel fiber), semakin banyak digunakan sebagai alternatif atau pelengkap tulangan konvensional dalam perkerasan kaku. Fiber ini tersebar merata di dalam campuran beton, sehingga mampu meningkatkan ketahanan beton terhadap retak mikro yang biasanya muncul akibat shrinkage dan beban dinamis. Dengan adanya fiber, perkembangan retak dapat dikendalikan lebih baik, sehingga memperpanjang umur pelat beton dan mengurangi risiko kerusakan struktural (Geremew *et al.*, 2021).

3. Perencanaan dan Desain Tulangan

a. Penentuan Kebutuhan Tulangan

Perencanaan tulangan didasarkan pada analisis beban dan tegangan yang dialami pelat beton selama masa layanan. Faktor-faktor yang mempengaruhi antara lain:

- 1) Intensitas dan jenis lalu lintas (jenis kendaraan dan frekuensi)
- 2) Ketebalan dan dimensi pelat beton
- 3) Kondisi *Subgrade* (CBR, kestabilan tanah)
- 4) Kondisi iklim dan temperatur lingkungan.

Desain tulangan mengikuti standar teknis seperti ACI 330R-14 atau SNI 03-2847-2002 (perencanaan struktur beton) yang mengatur jumlah, diameter, dan penempatan tulangan secara optimal.

b. Konfigurasi dan Jarak Tulangan

Pada perencanaan dan desain tulangan pada perkerasan kaku, konfigurasi dan jarak antar tulangan menjadi aspek yang sangat penting untuk memastikan performa struktur yang optimal. Tulangan biasanya dipasang dalam dua arah, yaitu longitudinal (searah dengan arah lalu lintas) dan transversal (melintang), agar dapat menahan tegangan tarik yang muncul akibat beban kendaraan serta perubahan suhu yang menyebabkan ekspansi dan kontraksi beton. Penempatan tulangan dua arah ini membantu

mendistribusikan beban secara merata, mengurangi risiko retak yang tidak terkendali, serta meningkatkan daya tahan pelat beton terhadap kerusakan jangka panjang (Delatte, 2017).

4. Proses Pelaksanaan Pemasangan Tulangan

a. Persiapan dan Penataan Tulangan

Proses pelaksanaan pemasangan tulangan merupakan tahap penting dalam konstruksi pelat beton bertulang yang harus dilakukan dengan cermat untuk memastikan kualitas dan kekuatan struktur. Setelah pondasi dan bekisting selesai dipersiapkan, tulangan baja harus dibersihkan terlebih dahulu dari segala jenis karat, minyak, dan kotoran yang menempel. Pembersihan ini penting karena kotoran pada permukaan tulangan dapat mengurangi daya lekat antara beton dan baja, yang pada akhirnya dapat mempengaruhi performa struktur dan menyebabkan kerusakan lebih cepat (Neville, 2011). Tulangan yang bersih akan menjamin ikatan yang kuat sehingga tegangan dapat ditransfer secara efektif antara beton dan baja.

Tahap berikutnya adalah penataan tulangan sesuai dengan gambar desain struktur. Tulangan harus dipasang pada posisi yang tepat sesuai perencanaan agar dapat menahan tegangan tarik dan beban yang diterima pelat beton secara optimal. Posisi tulangan yang salah atau tidak sesuai dapat menyebabkan konsentrasi tegangan dan mempercepat timbulnya retak pada beton. Untuk menjaga posisi tulangan agar tetap stabil selama proses pengecoran beton, digunakan spacer atau penyangga khusus yang akan mengangkat tulangan agar tidak menyentuh tanah dasar atau permukaan pondasi. Hal ini memastikan tulangan benar-benar berada di dalam beton sesuai dengan ketebalan lapisan yang direncanakan.

b. Pengikatan dan Penyambungan

Pengikatan dan penyambungan tulangan merupakan tahap penting dalam proses pemasangan tulangan pada konstruksi pelat beton bertulang. Setelah tulangan ditempatkan pada posisi yang sesuai, batang-batang tulangan harus diikat satu sama lain menggunakan kawat baja khusus. Pengikatan ini berfungsi untuk menjaga agar tulangan tetap stabil dan tidak bergeser selama proses pengecoran beton berlangsung. Kawat pengikat yang kuat

dan terpasang rapi memastikan posisi tulangan sesuai dengan desain struktur sehingga dapat berfungsi optimal dalam menahan tegangan tarik akibat beban lalu lintas.

Penyambungan tulangan juga sering kali diperlukan terutama jika panjang tulangan tidak mencukupi untuk menutupi seluruh area pelat beton. Penyambungan tulangan ini umumnya dilakukan dengan metode overlap atau tumpang tindih, dimana dua batang tulangan disambung dengan tumpang tindih minimal sepanjang 40 kali diameter tulangan. Jarak overlap ini dirancang untuk memastikan transfer tegangan tarik antara batang tulangan yang disambung sehingga sambungan tetap kuat dan tidak menjadi titik lemah dalam struktur beton. Selain metode *overlap*, penyambungan tulangan juga dapat dilakukan dengan pengelasan (sambungan las), terutama pada kasus di mana ruang atau kondisi lapangan tidak memungkinkan penggunaan *overlap*.

c. Pengawasan dan Kontrol

Pengawasan dan kontrol dalam proses pemasangan tulangan merupakan tahap krusial untuk memastikan mutu konstruksi pelat beton bertulang sesuai dengan standar yang telah ditetapkan. Pengawasan ini meliputi pemeriksaan posisi tulangan, jarak antar batang, serta jumlah tulangan yang dipasang sesuai dengan gambar desain dan spesifikasi teknis. Posisi tulangan yang tepat sangat penting karena berperan dalam mendistribusikan beban secara merata dan mencegah konsentrasi tegangan yang dapat menyebabkan retak prematur pada pelat beton (Delatte, 2017).

Kontrol ketat juga diperlukan untuk menghindari penyimpangan yang sering terjadi akibat kesalahan pemasangan di lapangan, seperti tulangan yang bergeser, jarak antar tulangan yang tidak sesuai, atau jumlah tulangan yang kurang dari ketentuan. Kesalahan-kesalahan tersebut dapat mengurangi kekuatan struktural dan durabilitas pelat beton. Oleh karena itu, pengawas lapangan harus melakukan pengecekan secara berkala dan mendokumentasikan hasil pemeriksaan untuk memastikan bahwa setiap tahap pemasangan tulangan memenuhi standar mutu yang berlaku. Hal ini juga membantu mendeteksi masalah sejak dini sehingga dapat segera diperbaiki sebelum proses pengecoran beton dimulai.

C. *Expansion Joint* dan *Contraction Joint*

Perkerasan kaku yang berbahan dasar beton memiliki sifat fisik yang sangat dipengaruhi oleh perubahan suhu dan kondisi lingkungan. Beton memiliki koefisien muai panjang yang menyebabkan perubahan dimensi secara signifikan akibat perubahan temperatur lingkungan (Neville, 2011). Untuk mengakomodasi perubahan ini dan menghindari kerusakan struktural seperti retak tak terkendali dan deformasi, digunakan dua jenis sambungan utama dalam konstruksi perkerasan beton, yaitu *expansion joint* dan *contraction joint*. Penggunaan joint ini sangat krusial dalam menjaga integritas struktural perkerasan kaku, memastikan distribusi tegangan yang tepat, dan memperpanjang umur pakai jalan beton.

1. *Expansion Joint* (Sambungan Pengembangan)

Expansion joint adalah sambungan yang dirancang untuk mengakomodasi pergerakan ekspansi atau pemuaian beton akibat kenaikan suhu atau kondisi lingkungan. Sambungan ini memberikan ruang gerak pada pelat beton agar tidak terjadi tekanan berlebih yang dapat menyebabkan retak atau deformasi. Fungsi utama *expansion joint* meliputi:

- a. Menghindari tekanan berlebih akibat pemuaian beton
- b. Mengurangi risiko retak akibat gaya tekan dalam pelat beton
- c. Menjamin kontinuitas fungsi struktural meskipun terjadi perubahan dimensi
- d. Memfasilitasi perpindahan beban secara efektif antar pelat beton.

Expansion joint biasanya berupa celah yang diisi dengan material elastomerik atau filler compressible seperti karet, aspal, atau bahan isolasi lainnya yang mampu menahan beban lalu lintas sekaligus memberikan ruang untuk pemuaian (Delatte, 2017).

- a. *Expansion Joint* dengan Gap Terbuka: Celah terbuka yang memungkinkan beton berkembang tanpa gesekan berlebih antar pelat.
- b. *Expansion Joint* dengan Filler Elastomerik: Menggunakan bahan pengisi fleksibel agar air dan kotoran tidak masuk, sekaligus memberikan pergerakan bebas.

Desain *expansion joint* mempertimbangkan faktor-faktor berikut:

- Perkiraan rentang suhu maksimum dan minimum di lokasi pembangunan (temperatur musim panas dan dingin)
- Koefisien muai beton (sekitar $9-12 \times 10^{-6}$ per $^{\circ}\text{C}$)
- Panjang panel beton dan dimensi perkerasan
- Beban lalu lintas yang akan diterima
- Material filler dan durability.

Rumus sederhana untuk lebar expansion joint yang diperlukan dapat dihitung sebagai:

$$W = \alpha \times L \times \Delta T$$

Dimana:

- W = lebar sambungan (m)
- α = koefisien muai panjang beton ($\text{m/m}/^{\circ}\text{C}$)
- L = panjang panel beton (m)
- ΔT = perubahan temperatur maksimum ($^{\circ}\text{C}$)

Contoh, untuk panel beton 5 m dengan perubahan suhu 40°C , dan $\alpha = 1.2 \times 10^{-5}$:

$$W = 1.2 \times 10^{-5} \times 5 \times 40 = 0.0024 \text{ m} = 2.4 \text{ mm}$$

Pada praktik lebar sambungan expansion joint biasanya dibuat lebih besar (10-25 mm) untuk mengakomodasi faktor lain seperti variasi material dan pergerakan dinamis. Teknik pelaksanaan *expansion joint*:

- Pembuatan Filler

Pembuatan filler pada *expansion joint* merupakan tahap penting dalam pelaksanaan perkerasan kaku untuk mengakomodasi gerakan termal dan mekanis pada pelat beton. Filler ini berfungsi sebagai bahan pengisi celah yang telah disiapkan antara dua segmen beton, sehingga dapat mencegah masuknya material asing seperti debu, air, dan kotoran yang dapat merusak struktur joint dan lapisan perkerasan. Material pengisi yang umum digunakan biasanya berupa karet atau elastomer, karena sifatnya yang elastis dan tahan terhadap tekanan serta perubahan suhu.

- Penempatan Celah

Penempatan celah *expansion joint* merupakan tahap krusial dalam pelaksanaan perkerasan kaku yang berfungsi untuk mengakomodasi pergerakan termal dan mekanis pada struktur beton. Celah ini harus dirancang dan ditempatkan secara strategis agar dapat bekerja optimal dalam mengurangi tegangan akibat ekspansi dan kontraksi beton. Secara umum, celah expansion

joint ditempatkan pada sambungan antar panel beton, titik pertemuan jembatan, serta di sekitar struktur yang memiliki potensi pergerakan seperti tiang penyangga atau dinding penahan (Neville, 2011). Penempatan yang tepat akan membantu mencegah retak yang tidak terkontrol dan kerusakan struktural yang dapat mengganggu fungsi jalan atau struktur tersebut.

c. Pengujian Kebocoran

Pengujian kebocoran pada *expansion joint* merupakan tahap penting dalam memastikan kinerja sambungan terhadap infiltrasi air dan material asing yang dapat merusak struktur beton. Setelah proses pemasangan filler selesai, dilakukan pengujian untuk mengevaluasi ketahanan sambungan terhadap tekanan air, terutama pada struktur yang berada di area terbuka dan rentan terhadap genangan. Tujuan utama dari pengujian ini adalah untuk memastikan bahwa *expansion joint* mampu menahan penetrasi air yang dapat menyebabkan degradasi pada tulangan baja atau lapisan subbase di bawah pelat beton (Delatte, 2017).

2. *Contraction Joint* (Sambungan Penyusutan)

Contraction joint adalah sambungan yang bertujuan untuk mengatur dan mengendalikan retak yang terjadi akibat penyusutan beton ketika beton mengering dan mengalami perubahan temperatur turun. Karena beton memiliki kecenderungan alami untuk retak akibat tegangan tarik pada penyusutan, *contraction joint* dibuat untuk “memaksa” retak terjadi di lokasi sambungan yang telah ditentukan dan dirancang agar retak tidak tersebar secara acak. Fungsi *contraction joint* antara lain:

- a. Mengendalikan retak akibat penyusutan beton
- b. Menentukan lokasi retak sehingga dapat dikendalikan dan dirawat lebih mudah
- c. Meminimalkan kerusakan permukaan pelat beton
- d. Menjaga estetika dan integritas struktural perkerasan.

Contraction joint biasanya berupa celah cetak (*saw cut joint*) atau celah konstruksi yang dibuat saat beton masih lunak dengan kedalaman tertentu untuk mengarahkan retak pada lokasi tersebut.

- a. *Contraction Joint Cetak (Saw Cut)*: Sambungan yang dibuat dengan alat pemotong beton (*saw*) pada kedalaman 20-25% dari ketebalan pelat beton.
- b. *Contraction Joint Bentuk*: Sambungan yang dibuat dengan memasang material pelepas (*bond breaker*) agar beton di bawah sambungan dapat bergerak bebas.

Desain *contraction joint* berkaitan dengan penentuan jarak antar sambungan dan kedalaman potongan. Jarak antar *contraction joint* biasanya antara 3-5 meter tergantung ketebalan dan kualitas beton, kondisi lalu lintas, serta tanah dasar. Kedalaman potongan *contraction joint* umumnya 1/4 sampai 1/3 dari ketebalan pelat beton, sehingga retak dapat diarahkan dengan efektif dan pelat tetap memiliki integritas struktural. Teknik pelaksanaan *contraction joint*:

- a. Pembuatan *Saw Cut*

Pembuatan *contraction joint* melalui metode *saw cut* merupakan teknik penting dalam pelaksanaan perkerasan kaku untuk mengendalikan retak akibat susut plastis dan susut pengeringan beton. *Saw cut* adalah proses pemotongan beton yang dilakukan secara mekanis dengan menggunakan alat pemotong khusus (*concrete saw*) untuk menciptakan garis lemah pada permukaan pelat beton. Tujuan dari pemotongan ini adalah agar retak yang terjadi karena tegangan tarik internal dapat terkonsentrasi dan mengikuti jalur yang telah ditentukan, sehingga tidak menyebar secara acak yang dapat mengganggu estetika dan kinerja struktural pelat.

- b. Penggunaan Bond Breaker

Penggunaan *bond breaker* merupakan salah satu teknik penting dalam pelaksanaan *contraction joint* pada konstruksi perkerasan kaku. *Bond breaker* adalah material yang diaplikasikan pada dasar atau sisi *contraction joint* dengan tujuan untuk mencegah terjadinya ikatan (*bonding*) antara lapisan beton dan permukaan di bawahnya, seperti subbase atau pelat lama. Teknik ini digunakan terutama pada sambungan *contraction joint* tipe *slip-form*, atau pada sambungan beton *overlay*, di mana beton baru tidak boleh menempel sepenuhnya pada beton lama atau permukaan lain agar gerakan termal dapat terjadi secara bebas.

- c. Kontrol Ketebalan dan Kedalaman:

Pada pelaksanaan contraction joint pada perkerasan beton, kontrol terhadap ketebalan dan kedalaman pemotongan (*saw cut*) merupakan aspek krusial yang menentukan keberhasilan fungsi sambungan tersebut. Tujuan utama contraction joint adalah untuk mengendalikan lokasi terjadinya retak akibat penyusutan beton selama proses hidrasi maupun karena perubahan suhu. Untuk itu, kedalaman pemotongan harus cukup agar dapat melemahkan bagian atas pelat beton dan memandu retak ke dalam celah sambungan. Jika kedalaman pemotongan terlalu dangkal, retakan dapat muncul di lokasi lain secara acak dan merusak estetika maupun kekuatan struktural pelat (Neville, 2011).

D. Finishing Permukaan Beton dan Curing

Finishing permukaan dan curing adalah tahap krusial dalam proses pelaksanaan perkerasan kaku beton. Setelah pengecoran, beton masih dalam keadaan plastis dan memerlukan penanganan yang tepat agar mencapai kekuatan, daya tahan, dan penampilan yang diharapkan (Neville, 2011). Proses finishing menentukan tekstur dan profil permukaan beton yang berpengaruh pada performa mekanik, keselamatan pengguna, dan estetika. Curing beton bertujuan menjaga kelembaban dan temperatur beton agar proses hidrasi semen berjalan optimal, sehingga struktur beton menjadi padat, kuat, dan tahan terhadap kerusakan akibat lingkungan. Tanpa curing yang memadai, beton mudah retak, kehilangan kekuatan, dan umur pakainya berkurang drastis (Kementerian PUPR, 2021).

1. Finishing Permukaan Beton

Finishing permukaan beton pada perkerasan kaku bertujuan untuk:

- a. Menghasilkan permukaan jalan yang rata, tidak licin, dan aman untuk lalu lintas kendaraan.
- b. Menghilangkan gelembung udara dan air dari permukaan beton yang dapat menyebabkan porositas dan keropos.
- c. Memberikan tekstur permukaan yang sesuai untuk mencegah aquaplaning dan meningkatkan gesekan.
- d. Menjaga integritas beton agar tidak mudah retak atau aus.

Finishing permukaan dilakukan melalui beberapa tahapan utama sebagai berikut:

1) *Screeding* (Penyekriman)

Screeding, atau penyekriman, merupakan tahap awal dalam proses finishing permukaan beton yang sangat penting untuk menjamin ketebalan dan kerataan pelat beton sesuai dengan spesifikasi desain. Proses ini dilakukan segera setelah pengecoran, ketika beton masih berada dalam kondisi plastis. Tujuan utama screeding adalah untuk meratakan permukaan beton serta menghilangkan kelebihan material, sehingga permukaan menjadi sejajar dan seragam. Alat yang umum digunakan dalam proses ini adalah straight edge, screed board, atau screed machine, tergantung pada skala pekerjaan dan kondisi lapangan (Delatte, 2017).

2) *Floating* (Pemukaan Awal)

Floating adalah tahap lanjutan setelah screeding yang bertujuan untuk memperhalus permukaan beton serta memperbaiki tampilan dan kekompakan beton pada fase awal pengerasan. Proses ini dilakukan saat beton mulai mengeras namun masih cukup plastis untuk dikerjakan. Floating membantu menghilangkan bekas alat screed, meratakan gelombang kecil di permukaan, dan menutup pori-pori halus, sehingga menghasilkan permukaan yang lebih homogen dan padat (Neville, 2011). *Floating* juga membantu mendistribusikan air semen ke seluruh permukaan secara merata dan mengangkat mortar halus ke atas untuk mempermudah finishing akhir.

3) *Troweling* (Penghalusan Akhir)

Troweling adalah tahap akhir dari proses finishing permukaan beton yang bertujuan untuk menghasilkan permukaan yang halus, padat, dan rata. Proses ini dilakukan setelah floating, ketika beton sudah cukup mengeras namun masih memungkinkan untuk dikerjakan. Troweling dapat dilakukan secara manual menggunakan hand trowel atau dengan mesin trowel (*power trowel*) untuk area yang lebih luas. Tujuan utama dari troweling adalah menutup pori-pori halus di permukaan, meningkatkan densitas beton, serta memperbaiki ketahanan aus dan tampilan akhir permukaan beton.

4) *Texturing* (Pemberian Tekstur)

Texturing atau pemberian tekstur pada permukaan beton merupakan tahap penting dalam finishing perkerasan jalan yang bertujuan untuk meningkatkan koefisien gesekan antara permukaan jalan dan ban kendaraan. Tekstur ini berfungsi mengurangi risiko tergelincir, terutama saat permukaan dalam kondisi basah atau licin. Tanpa tekstur yang memadai, permukaan beton yang halus akibat troweling dapat menyebabkan kendaraan kehilangan traksi, yang berpotensi memicu kecelakaan. Oleh karena itu, pemberian tekstur harus direncanakan dan dilaksanakan secara cermat sesuai standar keselamatan jalan (Neville, 2011).

2. Proses Curing Beton

Curing adalah proses menjaga kondisi kelembaban dan suhu beton setelah pengecoran agar hidrasi semen dapat berlangsung optimal dan beton memperoleh kekuatan yang diharapkan (Neville, 2011). Proses ini mencegah penguapan air yang berlebihan sehingga menghindari retak dan kerusakan dini. Tujuan curing meliputi:

- a. Menjamin kelanjutan reaksi hidrasi semen
- b. Menghindari pengeringan cepat yang dapat menyebabkan retak plastik dan retak penyusutan
- c. Meningkatkan kekuatan mekanik beton
- d. Meningkatkan ketahanan terhadap abrasi, frost, dan bahan kimia
- e. Memperbaiki ketahanan beton terhadap serangan korosi pada tulangan (jika ada).

Ada beberapa metode curing yang umum digunakan dalam pelaksanaan perkerasan kaku:

- a. *Water Curing* (Penyiraman atau Penggenangan)

Water curing atau curing dengan air merupakan salah satu metode paling umum dan efektif untuk menjaga kelembaban permukaan beton selama proses hidrasi berlangsung. Dalam metode ini, permukaan beton dijaga agar tetap basah melalui penyiraman berkala atau penggenangan dengan air. Tujuan utamanya adalah mencegah penguapan air dari permukaan beton yang masih segar, karena kehilangan air dapat menghambat proses hidrasi semen dan menyebabkan penurunan kekuatan beton. Proses ini biasanya dilakukan selama 7 hingga 14 hari,

tergantung jenis semen yang digunakan dan kondisi cuaca di lapangan.

b. *Membrane Curing* (Pelapisan Penutup)

Membrane curing adalah metode perawatan beton yang dilakukan dengan menutup permukaan beton menggunakan material penghalang untuk mencegah penguapan air. Teknik ini sangat berguna pada proyek yang sulit melakukan penyiraman berkelanjutan, seperti perkerasan area luas atau lokasi yang kekurangan pasokan air. Bahan penutup yang digunakan bisa berupa plastik lembaran, karung goni basah, atau senyawa curing compound berbentuk cair. Setelah beton selesai dicor dan permukaan mulai mengeras, lapisan penutup langsung diaplikasikan untuk menjaga kelembaban internal yang dibutuhkan dalam proses hidrasi semen (Delatte, 2017).

c. *Steam Curing* (Pemanasan Uap)

Steam curing adalah metode perawatan beton dengan menggunakan uap panas untuk mempercepat proses pengerasan atau hidrasi semen. Metode ini umumnya diaplikasikan pada produk beton pracetak seperti balok, panel, dan pipa beton, di mana percepatan waktu pengerasan sangat dibutuhkan untuk mempercepat produksi. Dengan pemanasan uap, reaksi kimia dalam beton berlangsung lebih cepat, sehingga kekuatan beton dapat dicapai dalam waktu yang jauh lebih singkat dibandingkan curing konvensional (Neville, 2011).

d. Curing dengan Peralatan Otomatis

Curing dengan peralatan otomatis merupakan inovasi terbaru dalam proses perawatan beton yang semakin banyak diterapkan pada proyek konstruksi besar dan kompleks. Sistem ini menggunakan alat khusus yang dirancang untuk menyemprotkan air secara otomatis pada permukaan beton, sehingga kelembaban yang dibutuhkan selama masa curing dapat terjaga secara konsisten tanpa bergantung pada tenaga kerja manual. Selain itu, peralatan ini juga dapat mengatur suhu lingkungan di sekitar beton, sehingga proses hidrasi semen berlangsung optimal dan menghasilkan beton dengan kekuatan maksimal (Civera *et al.*, 2024).

3. Faktor yang Mempengaruhi Proses Finishing dan Curing

a. Kondisi Lingkungan

Kondisi lingkungan memiliki pengaruh yang sangat besar terhadap keberhasilan proses finishing dan curing beton. Faktor seperti suhu udara, kelembaban relatif, dan kecepatan angin akan menentukan seberapa cepat air menguap dari permukaan beton. Dalam lingkungan dengan suhu tinggi dan kelembaban rendah, air dalam beton cenderung menguap lebih cepat, yang dapat menghambat proses hidrasi semen yang optimal. Akibatnya, beton bisa mengalami pengerasan dini sebelum proses finishing selesai, sehingga menghasilkan permukaan yang kasar, tidak rata, atau bahkan retak dini.

b. Komposisi Beton

Komposisi beton merupakan salah satu faktor utama yang mempengaruhi proses finishing dan curing. Setiap komponen dalam campuran beton baik itu jenis semen, kadar air, agregat, maupun aditif kimia memiliki peran signifikan dalam menentukan waktu setting (pengikatan awal dan akhir) serta karakteristik pengerasan beton. Sebagai contoh, semen dengan kecepatan hidrasi tinggi seperti semen tipe I akan membuat beton mengeras lebih cepat, sehingga proses finishing harus dilakukan dalam waktu yang lebih singkat setelah pengecoran. Keterlambatan dalam finishing pada beton dengan setting time cepat dapat mengakibatkan permukaan yang tidak rata atau tidak homogen.

c. Teknik Pelaksanaan dan Pengawasan

Teknik pelaksanaan dan pengawasan memiliki peran vital dalam menentukan kualitas akhir perkerasan beton, khususnya dalam tahap finishing dan curing. Tenaga kerja yang terampil dan berpengalaman dapat mengidentifikasi waktu yang tepat untuk melakukan *screeding*, *floating*, *troweling*, dan curing. Proses finishing yang dilakukan terlalu awal atau terlambat dapat mengakibatkan permukaan beton tidak rata, timbulnya porositas, atau bahkan retak dini. Oleh karena itu, pelatihan dan pemahaman teknis pekerja sangat berpengaruh terhadap keberhasilan implementasi di lapangan.

4. Dampak Finishing dan Curing terhadap Kualitas Perkerasan Kaku

Finishing dan curing merupakan dua tahapan penting yang secara langsung memengaruhi mutu akhir dari perkerasan kaku. Proses finishing yang dilakukan dengan benar akan memastikan bahwa permukaan beton rata, padat, dan memiliki tekstur sesuai kebutuhan fungsi jalan. Hal ini penting untuk menjamin kenyamanan dan keselamatan pengguna jalan, serta mendistribusikan beban kendaraan secara merata ke seluruh pelat beton. Sementara itu, curing yang dilakukan secara optimal dapat meningkatkan kekuatan tekan beton hingga 20–30% dibandingkan beton yang tidak diberi curing secara benar (Neville, 2011).

Curing yang baik juga memiliki dampak jangka panjang terhadap ketahanan beton terhadap lingkungan eksternal. Dengan menjaga kelembaban selama fase awal pengerasan, proses hidrasi semen berlangsung secara sempurna, menghasilkan struktur mikro beton yang lebih rapat dan tidak mudah ditembus oleh air atau bahan kimia. Hal ini sangat penting pada perkerasan jalan yang terpapar air hujan, cairan tumpahan kendaraan, serta gesekan akibat lalu lintas berat. Beton yang mengalami curing efektif memiliki permeabilitas lebih rendah dan ketahanan terhadap abrasi yang jauh lebih baik.

Jika finishing dilakukan secara tergesa-gesa atau tidak sesuai prosedur, bisa muncul berbagai cacat permukaan seperti retak plastik, gelombang, atau bahkan permukaan yang terlalu licin. Permukaan licin akan membahayakan keselamatan lalu lintas, terutama dalam kondisi basah. Di sisi lain, retak-retak awal dapat berkembang menjadi retak struktural yang mengurangi umur layan jalan secara drastis. Permukaan yang kasar dan tidak rata juga mempercepat ausnya ban kendaraan dan meningkatkan kebisingan.

E. Pengujian Mutu Beton (*Slump Test*, Kuat Tekan)

Pengujian mutu beton merupakan tahap vital dalam pelaksanaan perkerasan kaku, karena kualitas beton yang digunakan sangat menentukan kekuatan, daya tahan, dan performa jalan beton secara keseluruhan (Neville, 2011). Dua pengujian utama yang paling sering dilakukan di lapangan dan laboratorium adalah *Slump Test* untuk mengetahui konsistensi dan workability beton basah, serta Uji Kuat

Tekan untuk mengukur kekuatan tekan beton setelah pengerasan. Kedua pengujian ini saling melengkapi dalam memastikan bahwa beton yang digunakan memenuhi spesifikasi teknis dan standar mutu yang telah ditetapkan dalam desain perkerasan jalan beton.

1. Pengujian *Slump Test*

Slump Test adalah uji konsistensi beton segar yang digunakan untuk mengukur *workability* (kemudahan pengolahan) beton basah dengan alat sederhana berupa cone slump (kerucut slump). Tes ini sangat penting untuk memastikan bahwa beton memiliki sifat plastis yang tepat sehingga mudah dikerjakan, tidak terlalu cair yang dapat menyebabkan segregasi, dan tidak terlalu kaku yang dapat menyulitkan pemadatan. Tujuan utama Slump Test adalah:

- a. Menilai konsistensi beton segar
 - b. Mengontrol kualitas beton dalam pekerjaan lapangan
 - c. Memastikan beton mudah dipadatkan dan dihamparkan.
- 1) Alat dan Bahan
 - a) *Slump cone* (kerucut slump) standar dengan dimensi tinggi 300 mm, diameter bawah 200 mm, diameter atas 100 mm.
 - b) Penggaris atau pengukur untuk menentukan penurunan slump beton.
 - c) Beton segar yang diuji langsung dari proses pencampuran.
 - 2) Prosedur Pelaksanaan Slump Test

Tempatkan kerucut slump pada permukaan datar yang keras dan tidak menyerap air.

 - a) Isi kerucut dengan beton segar secara bertahap dalam tiga lapis, setiap lapis dipadatkan dengan tongkat pemadat sebanyak 25 kali.
 - b) Ratakan permukaan atas beton dengan alat penggaris.
 - c) Angkat kerucut secara vertikal dan perlahan.
 - d) Ukur penurunan beton dari puncak kerucut slump ke puncak beton yang telah turun (dalam milimeter). Nilai ini disebut nilai slump.
 - 3) Interpretasi Hasil Slump Test

- a) Nilai slump rendah (< 25 mm): beton kaku, sulit dipadatkan, cocok untuk struktur yang membutuhkan beton sangat padat seperti beton pracetak.
 - b) Nilai slump sedang (25-75 mm): beton dengan workability sedang, umum digunakan untuk jalan beton.
 - c) Nilai slump tinggi (> 75 mm): beton sangat cair, risiko segregasi dan bleeding tinggi, kurang cocok untuk perkerasan kaku.
- 4) Faktor yang Mempengaruhi Nilai Slump
- a) Rasio air-semen
 - b) Ukuran dan bentuk agregat
 - c) Kandungan udara terperangkap
 - d) Jenis semen dan aditif yang digunakan
 - e) Suhu dan kondisi lingkungan saat pencampuran.

2. Pengujian Kuat Tekan Beton

Uji Kuat Tekan adalah pengujian beton yang dilakukan untuk mengetahui kemampuan beton menahan beban tekan maksimum sebelum mengalami kerusakan (Neville, 2011). Kuat tekan merupakan parameter utama yang digunakan dalam desain perkerasan kaku jalan dan menjadi indikator utama mutu beton. Beton yang digunakan harus memenuhi kekuatan tekan minimum yang sudah ditentukan dalam desain, agar perkerasan mampu menahan beban lalu lintas selama masa layanan.

- a. Sampel dan Bentuk Pengujian
 - 1) Sampel uji umumnya berupa silinder beton dengan diameter 15 cm dan tinggi 30 cm, atau kubus beton dengan ukuran 15x15x15 cm (Kementerian PUPR, 2021).
 - 2) Sampel diambil dari hasil pengecoran beton di lapangan secara representatif.
 - 3) Sampel disimpan dalam kondisi curing yang dikontrol hingga hari pengujian (biasanya 7, 14, dan 28 hari).
- b. Prosedur Pengujian Kuat Tekan
 - 1) Sampel beton diuji menggunakan mesin uji tekan universal.
 - 2) Beban tekan diberikan secara perlahan dan merata pada permukaan sampel sampai terjadi kerusakan (retak atau pecah).

- 3) Nilai kekuatan tekan dihitung berdasarkan beban maksimum dibagi luas penampang sampel.
- c. Standar dan Nilai Rujukan
 - 1) Kuat tekan beton biasanya dinyatakan dalam satuan MPa (megapascal).
 - 2) Nilai kuat tekan yang umum untuk perkerasan kaku adalah 20-40 MPa tergantung kelas dan fungsi jalan.
 - 3) Standar pengujian mengacu pada ASTM C39, SNI 03-2834-2000, dan standar internasional lainnya.
- d. Analisis Hasil dan Kontrol Mutu
 - 1) Hasil uji kuat tekan menjadi dasar penerimaan beton.
 - 2) Jika kuat tekan tidak memenuhi standar, dilakukan evaluasi ulang campuran beton, bahan baku, atau metode pelaksanaan.
 - 3) Uji ulang dilakukan pada batch beton berikutnya untuk memastikan mutu tetap terjaga.

3. Hubungan antara Slump Test dan Kuat Tekan

Slump test merupakan salah satu metode pengujian sederhana yang digunakan untuk mengevaluasi tingkat kelecakan (*workability*) beton segar di lapangan. Walaupun tidak secara langsung mengukur kekuatan tekan, nilai slump dapat memberikan gambaran awal tentang kemungkinan kualitas beton yang akan dihasilkan. Semakin sesuai nilai slump dengan yang direncanakan dalam desain campuran, maka semakin besar kemungkinan beton akan mencapai kuat tekan yang diinginkan. Hal ini disebabkan karena slump test mencerminkan konsistensi dan homogenitas campuran beton, yang berperan penting dalam proses pengerasan dan pembentukan kekuatan struktural (Neville, 2011).

Beton dengan nilai slump yang terlalu tinggi biasanya memiliki kadar air yang berlebihan. Kelebihan air ini menyebabkan terjadinya segregasi, yaitu pemisahan antara agregat kasar dan pasta semen, serta bleeding atau keluarnya air ke permukaan beton. Kondisi ini menghasilkan beton dengan porositas tinggi dan kepadatan rendah, sehingga kuat tekan akhir akan menurun secara signifikan. Sebaliknya, beton dengan slump terlalu rendah bersifat kaku dan sulit untuk dipadatkan. Kurangnya pemadatan dapat menyebabkan terbentuknya rongga-rongga udara di dalam beton yang juga menurunkan kekuatan tekan karena mengurangi luas efektif penyaluran gaya tekan.

4. Pengujian Mutu Beton Lainnya yang Mendukung

Pengujian mutu beton dalam pelaksanaan perkerasan kaku juga meliputi:

- a. Uji kepadatan beton segar
- b. Uji kadar udara terperangkap
- c. Uji kecepatan gelombang ultrasonik (NDT)
- d. Uji modulus elastisitas beton

Pengujian ini membantu memberikan gambaran menyeluruh tentang kualitas beton dan memastikan kesesuaian dengan standar teknis.

5. Pengujian Mutu Beton dalam Pelaksanaan Perkerasan Kaku di Indonesia

Pada pelaksanaan proyek perkerasan kaku di Indonesia, pengujian mutu beton menjadi salah satu aspek krusial yang diatur secara ketat oleh Kementerian Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat (PUPR). Pengujian ini bertujuan untuk memastikan bahwa campuran beton yang digunakan memenuhi spesifikasi teknis yang telah ditetapkan, baik dari segi kelecakan (*workability*), kekuatan tekan, maupun daya tahan jangka panjang. Standar pengujian mutu beton ini mengacu pada Pedoman Teknis Bina Marga dan Standar Nasional Indonesia (SNI) terbaru, seperti SNI 2847:2019 tentang Persyaratan Beton Struktural untuk Bangunan Gedung dan SNI 1974:2011 tentang Metode Pengujian Slump Beton.

Uji slump biasanya dilakukan secara langsung di lapangan setiap kali pengecoran dilakukan. Slump test berfungsi untuk memastikan kelecakan beton masih berada dalam batas toleransi yang diizinkan dan sesuai dengan desain campuran. Apabila nilai slump terlalu tinggi atau rendah, maka beton dianggap tidak layak digunakan dan perlu dilakukan perbaikan campuran. Pengujian ini penting dilakukan secara berkala pada setiap batch pengecoran untuk menjamin konsistensi mutu beton di sepanjang proyek jalan.



BAB VIII

DRAINASE JALAN DAN PENGENDALIAN AIR

Drainase jalan dan pengendalian air, yang merupakan aspek krusial dalam konstruksi dan pemeliharaan perkerasan jalan. Drainase yang baik berfungsi untuk mengalirkan air hujan dan air permukaan dari maupun di bawah struktur jalan sehingga dapat mencegah kerusakan yang diakibatkan oleh infiltrasi air. Sistem drainase yang efektif mampu mempertahankan kestabilan tanah dasar dan memperpanjang umur perkerasan jalan dengan mengurangi risiko penurunan kekuatan dan deformasi lapisan perkerasan akibat kelembaban berlebih.

Perencanaan dan pelaksanaan sistem drainase harus mempertimbangkan kondisi topografi, jenis tanah, curah hujan, serta volume dan kecepatan aliran air. Sistem drainase jalan umumnya terdiri dari drainase permukaan dan drainase bawah permukaan. Drainase permukaan berfungsi mengalirkan air hujan langsung dari permukaan jalan melalui selokan, gorong-gorong, dan talang air. Sedangkan drainase bawah permukaan berperan menyalurkan air yang meresap ke lapisan tanah di bawah perkerasan, biasanya dengan pemasangan pipa perforasi dan material penyerap air seperti kerikil atau geotekstil.

A. Sistem Drainase Permukaan dan Bawah Permukaan

Drainase jalan merupakan salah satu aspek terpenting dalam perencanaan dan pelaksanaan konstruksi jalan. Fungsi utama drainase adalah mengendalikan aliran air permukaan dan air bawah tanah agar tidak merusak struktur jalan, memperpanjang umur layanan jalan, dan menjamin keamanan serta kenyamanan pengguna jalan. Sistem drainase terbagi menjadi dua jenis utama yaitu drainase permukaan dan drainase bawah permukaan, yang keduanya harus dirancang secara terpadu agar pengendalian air berjalan efektif. Oleh karena itu, sistem drainase

dirancang agar air permukaan cepat dialirkan keluar dari badan jalan, dan air tanah dikendalikan agar tidak menaikkan kadar air dalam tanah dasar jalan.

1. Drainase Permukaan

Drainase permukaan bertujuan mengalirkan air hujan atau air limpasan dari permukaan jalan dan sekitarnya agar tidak terjadi genangan dan kerusakan jalan. Air ini umumnya berasal dari hujan, aliran air dari lereng sekitar, atau limpasan dari jalan lain (Gupta, 2016). Prinsip utamanya adalah mempercepat aliran air agar segera dibuang ke saluran yang aman, sehingga air tidak meresap ke dalam struktur jalan atau tanah dasar. Komponen sistem drainase permukaan:

- a. Selokan tepi jalan (*side ditch*): Mengalirkan air sepanjang sisi jalan.
- b. Saluran terbuka: Saluran air terbuka untuk mengalirkan air limpasan dari selokan atau daerah tangkapan.
- c. Gorong-gorong (*culvert*): Menyediakan jalur air melintasi jalan agar air tidak menggenang.
- d. Uditch (*underdrain ditch*): Saluran di bawah bahu jalan yang membantu mengalirkan air.
- e. Rangkap atau sampah selokan: Dirancang agar air tetap mengalir lancar tanpa tersumbat.

Perancangan drainase permukaan meliputi:

- a. Penentuan kemiringan jalan dan bahu jalan untuk mempercepat limpasan air.
- b. Penentuan ukuran dan bentuk selokan untuk menampung debit air maksimum yang diperkirakan.
- c. Penempatan gorong-gorong pada titik aliran air lintas jalan.
- d. Pemilihan bahan pelapis selokan seperti beton, batu kali, atau rumput untuk mencegah erosi.

Debit air limpasan dihitung berdasarkan data curah hujan, daerah tangkapan, dan koefisien limpasan menggunakan metode rasional atau hidrologi sederhana:

$$Q = C \times i \times A$$

dimana:

- a. Q = debit limpasan (m^3/s)
- b. C = koefisien limpasan (0–1)

- c. i = intensitas hujan (mm/jam)
- d. A = luas daerah tangkapan (ha)

Hasil perhitungan ini menentukan ukuran saluran dan gorong-gorong yang diperlukan.

2. Drainase Bawah Permukaan

Drainase bawah permukaan berfungsi mengendalikan air tanah (*groundwater*) dan air yang meresap ke dalam tanah di bawah struktur jalan. Air tanah yang tinggi atau melimpah dapat mengurangi daya dukung tanah dasar, menyebabkan pelapukan material dasar, dan merusak lapisan perkerasan. Drainase bawah permukaan bertujuan untuk menurunkan muka air tanah sehingga struktur jalan tetap kering dan stabil. Sistem drainase bawah permukaan meliputi:

- a. Pipa drainase bawah tanah (*subsurface drains*): Pipa perforasi atau pipa berlubang yang ditanam di bawah permukaan tanah untuk mengalirkan air tanah ke titik pembuangan.
- b. Lapisan penyerap air (*drainage layer*): Lapisan agregat kasar di bawah perkerasan yang mempercepat aliran air ke pipa drainase.
- c. Saluran pengumpul (*collector drain*): Mengumpulkan air dari pipa drainase bawah tanah.
- d. Sumur resapan atau titik pembuangan: Tempat pembuangan akhir air drainase.

Perancangan drainase bawah permukaan meliputi:

- a. Penentuan kedalaman pipa drainase sesuai muka air tanah dan kedalaman tanah dasar.
- b. Penentuan kemiringan pipa agar air dapat mengalir secara gravitasi.
- c. Pemilihan bahan pipa yang tahan lama dan mudah perawatan (PVC, HDPE, atau beton berlubang).
- d. Penyusunan lapisan agregat sebagai media penyaring agar pipa tidak tersumbat.

Selain drainase bawah permukaan, teknik lain yang sering digunakan:

1) Pompa Sumur

Pompa sumur merupakan salah satu solusi drainase bawah permukaan yang digunakan pada daerah dengan muka air tanah yang sangat tinggi. Sistem ini bekerja dengan cara memompa air tanah dari bawah permukaan ke saluran

pembuangan atau sumur resapan, sehingga area konstruksi atau perkerasan jalan tetap kering dan stabil. Penggunaan pompa sumur sangat penting terutama saat proses pembangunan dilakukan di wilayah yang memiliki genangan air atau lahan rawa, di mana infiltrasi air ke permukaan dapat mengganggu proses pemadatan tanah dan pengecoran beton.

2) Pemadatan Tanah Dasar

Pemadatan tanah dasar merupakan salah satu metode efektif dalam sistem drainase bawah permukaan untuk mengendalikan pergerakan air tanah. Dengan meningkatkan kepadatan tanah, rongga-rongga pori di dalamnya menjadi lebih kecil, sehingga permeabilitas atau kemampuan tanah untuk mengalirkan air menurun secara signifikan. Hal ini menghambat kapilaritas atau kenaikan air tanah ke atas, yang sering menjadi penyebab kelembaban berlebih pada lapisan perkerasan jalan. Teknik ini biasanya diterapkan sebelum pekerjaan struktur dimulai, khususnya pada proyek jalan di daerah dengan muka air tanah tinggi (Yunianta & Setiadji, 2022).

3) *Geotekstil*

Geotekstil merupakan material permeabel yang banyak digunakan dalam sistem drainase bawah permukaan untuk memisahkan, menyaring, memperkuat, dan melindungi lapisan tanah. Dalam konteks drainase, *Geotekstil* berperan penting untuk mencegah partikel tanah halus masuk ke dalam sistem pipa atau saluran drainase, yang dapat menyebabkan penyumbatan dan menurunkan efisiensi sistem. *Geotekstil* ditempatkan di antara tanah dasar dan lapisan agregat atau langsung membungkus pipa drainase untuk menjaga aliran air tetap lancar sambil menyaring partikel tanah (Gupta, 2016).

3. Hubungan Drainase Permukaan dan Bawah Permukaan

Hubungan antara drainase permukaan dan drainase bawah permukaan merupakan aspek penting dalam perencanaan sistem pengendalian air secara menyeluruh, khususnya pada proyek infrastruktur seperti jalan dan perkerasan kaku. Drainase permukaan bertugas mengalirkan air hujan atau limpasan langsung dari permukaan

jalan, trotoar, atau area terbuka lainnya. Sistem ini biasanya terdiri dari saluran terbuka, gorong-gorong, inlet, dan saluran tertutup yang dirancang untuk segera membuang air dari permukaan agar tidak menggenang dan merusak struktur atau membahayakan pengguna jalan (Chu *et al.*, 2023).

Drainase bawah permukaan berfungsi untuk mengontrol air yang meresap ke dalam tanah atau berasal dari muka air tanah yang tinggi. Sistem ini meliputi penggunaan pipa perforasi, sumur resapan, geotekstil, dan lapisan agregat yang dirancang untuk menurunkan kadar kelembaban tanah di bawah struktur jalan atau bangunan. Jika air bawah tanah tidak dikendalikan dengan baik, dapat menyebabkan pengangkatan (*uplift*), pengenduran tanah dasar (*Subgrade*), hingga retak dan kerusakan dini pada struktur perkerasan.

4. Implementasi Drainase dalam Proyek Jalan

- a. Tahap Perencanaan
 - 1) Survei hidrologi dan hidrogeologi untuk memahami pola aliran air.
 - 2) Penentuan kebutuhan drainase berdasarkan kondisi medan, iklim, dan jenis jalan.
 - 3) Desain saluran dan pipa drainase yang sesuai standar teknis (SNI, AASHTO, atau PUPR).
- b. Tahap Pelaksanaan
 - 1) Pelaksanaan penggalian dan pemasangan saluran drainase permukaan dengan kemiringan yang sesuai.
 - 2) Pemasangan pipa drainase bawah tanah dengan perlindungan agregat dan geotekstil.
 - 3) Pengecekan kemiringan dan sambungan pipa agar tidak terjadi penyumbatan atau kebocoran.
 - 4) Perawatan dan pembersihan rutin untuk menjaga fungsi drainase.

5. Dampak Drainase yang Tidak Efektif

Drainase yang kurang baik dapat menimbulkan:

- a. Genangan air di badan jalan yang mengurangi kenyamanan dan meningkatkan risiko kecelakaan.
- b. Kerusakan lapisan perkerasan akibat air yang meresap ke dalam tanah dasar (pengikisan dan pelunakan).

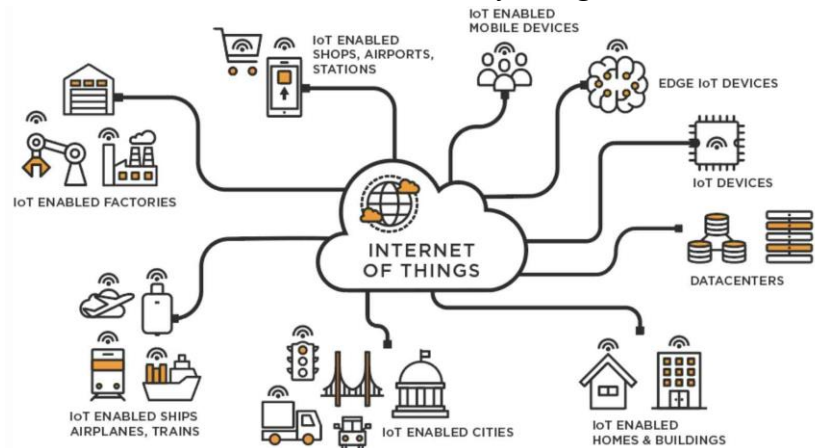
- c. Penurunan stabilitas bahu dan lereng jalan.
- d. Percepatan kerusakan struktural jalan dan peningkatan biaya pemeliharaan.

6. Inovasi dan Teknologi dalam Sistem Drainase Jalan

- a. Drainase Berkelanjutan (*Sustainable Drainage Systems* - SuDS)
 Drainase berkelanjutan atau *Sustainable Drainage Systems* (SuDS) merupakan pendekatan inovatif dalam pengelolaan limpasan air hujan yang dirancang untuk meniru siklus alami air. Konsep ini bertujuan mengurangi dampak negatif urbanisasi terhadap aliran permukaan, dengan mengutamakan penahanan air, infiltrasi, dan perlambatan aliran sebelum mencapai saluran air utama. SuDS mengintegrasikan fitur seperti bioretensi, kolam retensi, saluran vegetatif (*swales*), dan permeable pavement, sehingga air dapat diserap ke dalam tanah atau tertahan sementara, menghindari aliran cepat dan volume limpasan yang besar.
- b. Penggunaan Material Permeabel
 Penggunaan material permeabel dalam sistem drainase jalan merupakan salah satu inovasi yang efektif untuk mengelola air limpasan secara langsung di permukaan. Material seperti permeable paving block, porous asphalt, dan pervious concrete dirancang agar memungkinkan air hujan meresap melalui celah atau pori-pori di permukaan menuju lapisan bawah tanah. Dengan cara ini, air tidak langsung mengalir ke saluran drainase, melainkan diresapkan untuk mengisi kembali cadangan air tanah dan mengurangi tekanan terhadap sistem drainase konvensional. Penerapan teknologi ini sangat ideal untuk area parkir, trotoar, serta jalur pejalan kaki di kawasan perkotaan.
- c. Teknologi Monitoring Drainase
 Teknologi monitoring drainase berbasis sensor dan sistem *Internet of Things* (IoT) merupakan inovasi penting dalam manajemen infrastruktur jalan modern. Sistem ini memungkinkan pemantauan kondisi drainase secara real-time, termasuk tinggi muka air, kecepatan aliran, dan keberadaan sedimen atau penyumbatan. Sensor-sensor dipasang di berbagai titik strategis seperti saluran air, gorong-gorong, dan sumur resapan, lalu data yang dikumpulkan dikirim ke pusat kontrol melalui jaringan nirkabel untuk dianalisis secara otomatis.

Dengan sistem ini, operator dapat segera mengetahui kondisi abnormal dan merespons secara cepat untuk mencegah kerusakan lebih lanjut.

Gambar 1. *Internet of Things*



Sumber: *Forbes*

Penggunaan teknologi monitoring drainase telah terbukti meningkatkan efisiensi perawatan dan memperpanjang umur infrastruktur. Sistem ini memungkinkan pendekatan pemeliharaan berbasis kondisi (*condition-based maintenance*) dibandingkan dengan metode konvensional yang bersifat rutin namun tidak efisien. Misalnya, apabila sensor mendeteksi penyumbatan atau kenaikan muka air di luar batas normal, tim pemeliharaan dapat segera dikirim untuk melakukan tindakan sebelum terjadi genangan atau kerusakan pada jalan. Selain itu, data historis dari sistem ini dapat digunakan untuk analisis tren dan pengambilan keputusan jangka panjang dalam perencanaan drainase.

B. Peran Drainase terhadap Umur Perkerasan

Perkerasan jalan merupakan elemen struktural utama yang berfungsi menyalurkan beban lalu lintas ke tanah dasar secara merata dan aman. Umur perkerasan sangat dipengaruhi oleh berbagai faktor, termasuk kualitas material, teknik konstruksi, beban lalu lintas, serta kondisi lingkungan. Salah satu faktor lingkungan yang sangat berpengaruh adalah keberadaan dan pengendalian air di sekitar struktur perkerasan (Chu *et al.*, 2023). Drainase yang buruk menyebabkan air

menggenang atau meresap ke dalam lapisan perkerasan dan tanah dasar, yang dapat mempercepat kerusakan dan memperpendek umur jalan. Oleh karena itu, peran drainase dalam memperpanjang umur perkerasan sangat penting dan menjadi perhatian utama dalam desain dan pemeliharaan jalan.

1. Mekanisme Kerusakan Perkerasan Akibat Air

Air dapat menyebabkan kerusakan pada perkerasan jalan melalui beberapa mekanisme utama:

a. Penurunan Kekuatan Tanah Dasar

Penurunan kekuatan tanah dasar merupakan salah satu mekanisme kerusakan utama pada perkerasan jalan yang disebabkan oleh infiltrasi air. Ketika air masuk ke dalam lapisan tanah dasar, terutama pada jenis tanah lempung atau tanah dengan plastisitas tinggi, kandungan air yang meningkat menyebabkan pelunakan struktur tanah. Butiran tanah menjadi lebih mudah bergeser karena ikatan antarpartikel melemah akibat air yang bertindak sebagai pelumas. Hal ini mengakibatkan penurunan nilai modulus elastisitas tanah, sehingga tanah tidak lagi mampu mendukung beban lalu lintas secara optimal (Yunianta & Setiadji, 2022).

b. Erosi dan Pengikisan Material Perkerasan

Erosi dan pengikisan material perkerasan merupakan salah satu bentuk kerusakan struktural yang disebabkan oleh keberadaan dan pergerakan air. Ketika air hujan atau air limpasan permukaan tidak dialirkan secara efektif oleh sistem drainase, air tersebut dapat mengalir di atas permukaan jalan atau meresap melalui celah dan retakan pada lapisan perkerasan. Aliran air ini, terutama yang memiliki kecepatan tinggi, mampu membawa partikel halus dan agregat kecil keluar dari lapisan perkerasan, suatu proses yang dikenal sebagai erosi hidrolik. Kehilangan partikel ini secara bertahap mengurangi integritas struktural lapisan jalan.

c. Siklus Pembekuan dan Pencairan (*Freeze-Thaw*)

Siklus pembekuan dan pencairan (*freeze-thaw*) merupakan salah satu penyebab kerusakan serius pada struktur perkerasan, terutama di wilayah beriklim dingin. Ketika air meresap ke dalam celah atau pori-pori perkerasan dan kemudian membeku, volume

air akan mengembang hingga sekitar 9%. Tekanan akibat ekspansi ini menyebabkan retakan mikro yang semakin membesar seiring berulangnya siklus tersebut. Lama-kelamaan, retakan ini menyebabkan permukaan perkerasan terkelupas (*spalling*) dan mempercepat pelapukan lapisan atas.

d. Penurunan Kinerja Aspal

Air merupakan salah satu faktor utama yang dapat menurunkan kinerja perkerasan aspal. Ketika air masuk ke dalam lapisan perkerasan, terutama pada sambungan antar agregat dan bahan pengikat aspal, terjadi proses yang dikenal sebagai stripping atau hilangnya adhesi. Proses ini menyebabkan ikatan antara agregat dan aspal melemah atau bahkan terputus, sehingga agregat menjadi mudah terlepas dari matriks aspal. Kondisi ini secara langsung menurunkan kekuatan struktural perkerasan dan meningkatkan risiko kerusakan lebih cepat.

2. Hubungan Drainase dan Umur Perkerasan

Berdasarkan studi empiris dan eksperimen laboratorium, terdapat hubungan erat antara efektivitas sistem drainase dan umur perkerasan jalan. Berikut penjelasannya:

a. Drainase yang Baik Memperpanjang Umur Perkerasan

Drainase yang baik berperan penting dalam memperpanjang umur perkerasan jalan. Dengan sistem drainase yang efektif, air dari permukaan jalan maupun dari tanah dasar dapat segera dialirkan dan dihilangkan. Hal ini mencegah penumpukan kelembaban yang dapat menurunkan daya dukung tanah dasar serta menghindari kerusakan akibat air yang meresap ke lapisan perkerasan. Sebagai hasilnya, perkerasan dapat tetap stabil dan kuat untuk menahan beban lalu lintas dalam jangka waktu yang lebih lama (Yunianta & Setiadji, 2022).

b. Pengaruh Drainase Terhadap Daya Dukung Tanah Dasar

Drainase yang baik memiliki pengaruh signifikan terhadap daya dukung tanah dasar di bawah perkerasan jalan. Dengan sistem drainase yang efektif, kadar air di dalam tanah dasar dapat dikontrol dan dijaga pada tingkat yang rendah. Penurunan kadar air ini penting karena air yang berlebih dalam tanah dasar akan menyebabkan tanah menjadi lunak dan kehilangan kekuatan mekaniknya. Kondisi tanah yang jenuh air menyebabkan

penurunan modulus elastisitas tanah, yang berarti tanah menjadi kurang mampu menahan beban dari perkerasan dan lalu lintas yang melintas di atasnya.

c. Pengurangan Kerusakan Akibat Erosi dan Genangan

Kerusakan perkerasan akibat erosi dan genangan air merupakan masalah umum yang dapat diminimalkan melalui sistem drainase yang dirancang dan dipelihara dengan baik. Ketika air tidak dapat segera dialirkan dari permukaan jalan, maka akan terjadi genangan yang dapat menembus celah-celah pada perkerasan dan melonggarkan ikatan antar material penyusun. Dalam jangka panjang, kondisi ini mempercepat kerusakan seperti lubang, retak, dan deformasi pada lapisan permukaan. Sistem drainase permukaan seperti saluran tepi, kemiringan melintang jalan, serta saluran pembuangan air yang memadai sangat penting untuk menghindari akumulasi air yang berlebihan (Gupta, 2016).

3. Komponen Drainase yang Mempengaruhi Umur Perkerasan

a. Drainase Permukaan

Drainase permukaan merupakan komponen utama dalam sistem pengendalian air di jalan raya yang berfungsi untuk mengalirkan air hujan dari badan jalan dan bahu jalan secepat mungkin. Air hujan yang dibiarkan menggenang di atas permukaan jalan dapat meningkatkan risiko kerusakan perkerasan karena memperpanjang waktu kontak air dengan lapisan permukaan, sehingga memungkinkan air meresap ke dalam struktur jalan. Oleh karena itu, perencanaan sistem drainase permukaan harus memperhatikan kemiringan badan jalan, jenis material permukaan, serta kapasitas selokan dan gorong-gorong di sekitar jalan.

b. Drainase Bawah Permukaan

Drainase bawah permukaan adalah elemen penting dalam sistem drainase jalan yang berfungsi mengendalikan air tanah dan mencegah akumulasi air di bawah lapisan perkerasan. Sistem ini biasanya terdiri dari lapisan agregat kasar yang bersifat permeabel dan pipa drainase yang tertanam di bawah permukaan tanah. Fungsinya adalah untuk mengalirkan air yang meresap dari permukaan atau berasal dari muka air tanah yang tinggi agar tidak mencapai lapisan tanah dasar atau struktur perkerasan.

Dengan demikian, drainase bawah permukaan membantu menjaga kestabilan struktur jalan dari dalam.

4. Strategi Perbaikan dan Pemeliharaan Drainase untuk Memperpanjang Umur Perkerasan

a. Perawatan Rutin Sistem Drainase

Perawatan rutin sistem drainase merupakan salah satu strategi penting dalam memperpanjang umur perkerasan jalan. Sistem drainase, baik permukaan maupun bawah permukaan, dirancang untuk mengalirkan air secara efektif agar tidak menggenang atau meresap ke dalam lapisan perkerasan. Namun, seiring waktu, saluran drainase dapat mengalami penyumbatan akibat akumulasi sampah, sedimen, dan material lainnya. Jika tidak dibersihkan secara rutin, aliran air akan terhambat dan dapat menyebabkan genangan yang merusak struktur jalan. Oleh karena itu, kegiatan pembersihan dan pemeliharaan harus dilakukan secara berkala dan sistematis.

b. Penambahan dan Perbaikan Sistem Drainase

Penambahan dan perbaikan sistem drainase merupakan langkah strategis untuk memperpanjang umur perkerasan jalan, terutama pada lokasi yang menunjukkan tanda-tanda kegagalan fungsional seperti genangan air atau pelunakan tanah dasar. Titik-titik genangan sering kali muncul karena kapasitas saluran drainase tidak mencukupi atau karena tidak adanya sistem drainase yang memadai di area tersebut. Dalam kasus seperti ini, perlu dilakukan analisis teknis untuk menentukan jenis dan lokasi sistem drainase tambahan yang paling efektif guna mengalirkan air dari permukaan maupun bawah permukaan jalan secara efisien.

c. Penggunaan Material dan Teknik Konstruksi yang Mendukung Drainase

Penggunaan material dan teknik konstruksi yang mendukung sistem drainase merupakan komponen penting dalam upaya memperpanjang umur perkerasan jalan. Material yang digunakan dalam konstruksi jalan, seperti campuran aspal dan beton, harus memiliki sifat tahan terhadap penetrasi air. Penggunaan material dengan permeabilitas rendah, seperti beton dengan rasio air-semen yang terkontrol dan aspal dengan kadar void yang rendah,

membantu mencegah air masuk ke dalam struktur perkerasan. Selain itu, penggunaan lapisan tambahan seperti lapisan kedap air (*waterproofing*) atau *Geotekstil* dapat memperkuat perlindungan terhadap rembesan air.

C. Desain dan Pelaksanaan Saluran Drainase

Saluran drainase merupakan komponen penting dalam sistem drainase jalan yang berfungsi mengalirkan air permukaan dan bawah permukaan agar tidak menggenang dan merusak struktur perkerasan jalan. Desain dan pelaksanaan saluran drainase harus memperhatikan aspek teknis dan lingkungan agar saluran dapat bekerja optimal, tahan lama, dan ramah lingkungan (Yunianta & Setiadji, 2022). Desain saluran drainase yang baik akan meminimalisir risiko banjir, erosi tanah, dan kerusakan jalan akibat kelembaban berlebih.

1. Prinsip-prinsip Desain Saluran Drainase Jalan

Untuk mendesain saluran drainase jalan, terdapat beberapa prinsip yang harus diperhatikan, yaitu:

a. Fungsi Drainase

Fungsi utama dari saluran drainase jalan adalah untuk mengalirkan air hujan yang jatuh di area tangkapan ke tempat pembuangan akhir secara cepat dan aman. Saluran ini harus mampu menampung debit air dari permukaan jalan serta area sekitarnya seperti bahu jalan dan trotoar. Apabila aliran air tidak tertangani dengan baik, maka akan terjadi genangan yang dapat merusak lapisan perkerasan dan mengganggu kenyamanan serta keselamatan pengguna jalan.

b. Kemiringan dan Kapasitas

Kemiringan saluran drainase merupakan aspek penting dalam desain sistem drainase jalan karena secara langsung memengaruhi kecepatan aliran air. Kemiringan yang terlalu landai akan menyebabkan aliran lambat, sehingga partikel sedimen seperti lumpur dan pasir mudah mengendap di dasar saluran. Akumulasi sedimen ini akan menurunkan kapasitas saluran dan meningkatkan risiko genangan air. Sebaliknya, kemiringan yang terlalu curam akan menghasilkan kecepatan

aliran yang tinggi dan berpotensi menyebabkan erosi dinding atau dasar saluran.

c. Daya Tahan dan Kestabilan

Daya tahan dan kestabilan merupakan prinsip penting dalam desain saluran drainase jalan yang berfungsi dalam jangka panjang. Material yang digunakan untuk membangun saluran harus mampu menahan abrasi akibat aliran air yang membawa partikel sedimen, serta tahan terhadap perubahan cuaca dan reaksi kimia dari air hujan. Beton bertulang, pasangan batu, atau *Geotekstil* diperkuat sering digunakan karena memiliki ketahanan yang baik terhadap degradasi fisik.

d. Kemudahan Pemeliharaan

Kemudahan pemeliharaan merupakan prinsip penting dalam desain saluran drainase jalan, mengingat saluran yang tersumbat dapat menyebabkan genangan dan kerusakan pada struktur perkerasan. Oleh karena itu, saluran harus dirancang dengan akses yang memadai untuk inspeksi, pembersihan, dan perbaikan. Misalnya, penambahan manhole (lubang inspeksi), grill yang mudah dibuka, serta dimensi saluran yang cukup besar untuk memungkinkan alat atau tenaga kerja masuk ke dalam saluran.

2. Proses Perencanaan dan Perhitungan Desain Saluran Drainase

a. Penentuan Debit Rancangan

Debit aliran yang harus dialirkan oleh saluran drainase dihitung berdasarkan analisis hidrologi. Metode yang umum digunakan adalah metode Rational atau SCS Curve Number untuk memperkirakan debit puncak limpasan. Rumus metode Rational:

$$Q = C \times i \times A$$

dimana:

- 1) Q = debit limpasan (m^3/s)
- 2) C = koefisien limpasan (tanah dan penggunaan lahan)
- 3) i = intensitas hujan (mm/jam)
- 4) A = luas daerah tangkapan (ha)

b. Perhitungan Dimensi Saluran

Dimensi saluran (lebar, kedalaman, dan kemiringan) ditentukan agar saluran mampu mengalirkan debit puncak tanpa meluap. Persamaan Manning banyak digunakan untuk menghitung kecepatan dan kapasitas aliran pada saluran terbuka:

$$V = \frac{1}{n} R^{2/3} S^{1/2}$$

di mana:

- 1) V = kecepatan aliran (m/s)
- 2) n = koefisien kekasaran Manning
- 3) R = jari-jari hidrolik (m)
- 4) S = kemiringan saluran

Kapasitas aliran dihitung dengan:

$$Q = A \times V$$

di mana A adalah luas penampang aliran.

c. Penentuan Material dan Struktur

Penentuan material dan struktur saluran drainase merupakan tahap krusial dalam proses perencanaan karena akan memengaruhi umur layanan, kekuatan struktural, dan efisiensi pemeliharaan saluran. Pemilihan material harus mempertimbangkan kondisi hidrologi dan geoteknik di lokasi proyek, serta potensi beban yang akan diterima dari aliran air, sedimen, maupun beban lalu lintas di atasnya. Material yang umum digunakan antara lain beton bertulang, pasangan batu, baja, serta material polimer atau plastik khusus yang tahan korosi. Beton bertulang menjadi pilihan utama pada area dengan debit besar dan kecepatan aliran tinggi karena mampu menahan tekanan dan abrasi.

Struktur saluran juga harus disesuaikan dengan kondisi lapangan. Di daerah dengan tanah tidak stabil atau lereng curam, saluran dengan struktur tambahan seperti turap atau penahan dinding diperlukan agar tidak terjadi longsor atau pergeseran tanah yang bisa merusak fungsi drainase. Saluran dapat dibuat berbentuk U, V, trapezoidal, atau persegi tergantung kebutuhan ruang dan kapasitas hidraulik. Selain itu, sambungan antarsegmen saluran juga harus dirancang agar tidak bocor atau retak akibat pergerakan tanah atau beban dinamis dari lalu lintas di atasnya.

3. Material Saluran Drainase

Beberapa material umum yang digunakan dalam konstruksi saluran drainase meliputi:

- a. Beton: kuat dan tahan lama, cocok untuk saluran utama yang menerima aliran besar.
- b. Batu kali atau batu pecah: digunakan untuk saluran terbuka dengan kemiringan kecil dan aliran lambat.
- c. Tanah stabil dan pasir: digunakan pada saluran sementara atau daerah dengan aliran kecil.
- d. Pipa PVC atau HDPE: untuk saluran bawah permukaan, tahan korosi dan mudah dipasang.

4. Tahapan Pelaksanaan Saluran Drainase

a. Persiapan Lokasi

Tahap persiapan lokasi merupakan langkah awal yang sangat penting dalam pelaksanaan pembangunan saluran drainase. Kegiatan ini mencakup pembersihan lahan dari vegetasi, sampah, dan material lain yang dapat menghambat pelaksanaan konstruksi. Selain itu, area kerja juga harus dibebaskan dari bangunan atau struktur sementara yang berada di jalur saluran. Pembersihan ini bertujuan untuk menciptakan ruang kerja yang aman, rapi, dan meminimalkan gangguan terhadap aktivitas konstruksi, serta mencegah kerusakan alat berat akibat benda-benda tersembunyi di dalam tanah.

Setelah area dibersihkan, dilakukan penandaan jalur saluran berdasarkan gambar desain teknik yang telah disetujui. Penandaan dilakukan menggunakan patok, tali ukur, dan alat ukur seperti theodolite atau total station untuk memastikan ketepatan posisi horizontal dan vertikal. Proses ini menjadi referensi penting dalam menggali saluran dan menentukan elevasi dasar galian. Penandaan juga membantu kontraktor memastikan dimensi dan kemiringan saluran sesuai dengan rencana desain, yang berpengaruh langsung terhadap kapasitas dan efisiensi aliran air dalam saluran.

b. Penggalan Saluran

Tahap penggalan saluran merupakan proses krusial dalam pelaksanaan konstruksi saluran drainase, karena akan menentukan kesesuaian bentuk, ukuran, dan fungsi saluran

dengan desain teknis. Penggalian dilakukan mengikuti dimensi lebar, kedalaman, dan kemiringan dasar saluran yang telah ditetapkan dalam gambar kerja. Proses ini bertujuan untuk membentuk alur saluran yang mampu menampung dan mengalirkan debit air sesuai perhitungan hidrologi dan hidraulika. Kegiatan penggalian juga harus mempertimbangkan stabilitas dinding galian agar tidak terjadi longsor selama atau setelah pelaksanaan konstruksi.

c. Pemasangan Struktur Saluran

Tahap pemasangan struktur saluran merupakan fase inti dalam pelaksanaan drainase jalan, di mana elemen-elemen fisik saluran dibentuk dan dirakit sesuai rancangan. Untuk saluran dari beton, proses dimulai dengan pemasangan bekisting atau cetakan yang berfungsi menjaga bentuk dan dimensi saluran selama pengecoran. Beton kemudian dicor ke dalam cetakan menggunakan mutu beton yang sesuai standar teknis, seperti K-250 atau lebih tinggi, tergantung beban dan kondisi lingkungan. Proses pengecoran harus dilakukan secara merata dan tanpa celah, dilanjutkan dengan proses curing agar beton mencapai kekuatan optimal dan tidak retak akibat pengeringan terlalu cepat.

Pemasangan pipa drainase, baik untuk saluran bawah permukaan maupun saluran tertutup, harus memperhatikan kemiringan yang konsisten agar air dapat mengalir secara gravitasi tanpa hambatan. Pipa harus ditempatkan dengan hati-hati dan dilakukan pengujian level serta elevasi menggunakan alat ukur seperti waterpass atau theodolite. Kesalahan kecil dalam kemiringan dapat menyebabkan genangan atau aliran balik, sehingga mengurangi efektivitas sistem drainase. Selain itu, sambungan antar pipa harus dirapatkan secara sempurna untuk mencegah kebocoran atau perembesan tanah masuk ke dalam sistem.

d. Pengurugan dan Pemadatan

Setelah struktur saluran drainase selesai dipasang, tahap berikutnya adalah pengurugan dan pemadatan. Proses ini bertujuan untuk menutup kembali galian di sekitar saluran dengan tanah yang sesuai dan memastikan kestabilan struktur saluran tersebut. Pengurugan dilakukan secara bertahap, lapis

demis lapis, menggunakan tanah hasil galian yang memenuhi kriteria teknis atau material tambahan seperti pasir atau tanah pilihan jika diperlukan. Ketebalan setiap lapisan biasanya dibatasi, misalnya 15–20 cm, agar proses pemadatan dapat dilakukan secara efektif pada setiap tahapnya.

Pemadatan merupakan tahap penting yang tidak boleh diabaikan karena menentukan stabilitas jangka panjang dari saluran dan lapisan tanah di sekitarnya. Tanah yang tidak dipadatkan dengan baik berpotensi mengalami penurunan (*settlement*) yang bisa menyebabkan keretakan, pergeseran saluran, atau bahkan runtuhnya struktur. Oleh karena itu, alat pemadat seperti stamper, vibrator plate, atau roller digunakan sesuai kondisi medan dan volume pekerjaan.

e. Pengujian dan Pemeriksaan

Setelah proses pengurugan dan pemadatan selesai, tahap berikutnya dalam pelaksanaan saluran drainase adalah pengujian dan pemeriksaan. Pengujian aliran dilakukan untuk memastikan bahwa saluran mampu mengalirkan air sesuai dengan desain tanpa mengalami penyumbatan maupun kebocoran. Proses ini biasanya melibatkan pengaliran air dengan debit tertentu melalui saluran untuk mengecek kelancaran aliran dan mendeteksi adanya hambatan. Jika ditemukan hambatan atau penyumbatan, maka segera dilakukan pembersihan atau perbaikan agar fungsi saluran tetap optimal.

Selain pengujian aliran, pemeriksaan visual juga sangat penting dilakukan. Pemeriksaan ini bertujuan untuk mendeteksi adanya cacat konstruksi yang mungkin tidak terlihat pada tahap sebelumnya, seperti retakan pada beton, pergeseran pipa drainase, atau kerusakan lapisan penyaring seperti geotekstil. Deteksi dini terhadap cacat ini sangat krusial untuk mencegah kerusakan yang lebih besar di kemudian hari, yang bisa mengganggu kinerja sistem drainase dan memperpendek umur perkerasan jalan.



BAB IX

EVALUASI MUTU DAN PENGUJIAN LAPANGAN

Evaluasi mutu dan pengujian lapangan merupakan tahap krusial dalam proses konstruksi perkerasan jalan untuk memastikan bahwa pekerjaan yang dilakukan sesuai dengan standar teknis dan spesifikasi yang telah ditetapkan. Evaluasi mutu ini meliputi berbagai pengujian yang dilakukan di lapangan untuk mengukur parameter penting seperti kepadatan, ketebalan, kekuatan, serta karakteristik material yang digunakan. Dengan pengujian ini, kualitas perkerasan jalan dapat dipastikan sehingga menjamin ketahanan dan umur pakai jalan yang optimal.

Pengujian lapangan biasanya mencakup uji kepadatan tanah menggunakan metode *sand cone* atau *nuclear density gauge*, pengukuran ketebalan lapisan perkerasan dengan alat ukur khusus, serta pengujian material seperti Marshall Test untuk aspal dan uji kuat tekan beton. Selain itu, pengujian sifat fisik dan mekanis material lapis perkerasan juga dilakukan untuk memastikan sesuai dengan persyaratan desain. Semua data yang diperoleh dari pengujian ini akan dianalisis dan dibandingkan dengan standar untuk menentukan apakah hasil pekerjaan memenuhi mutu yang diharapkan atau perlu dilakukan perbaikan.

A. Uji Kepadatan Tanah (*Sand Cone, Nuclear Density*)

Uji kepadatan tanah merupakan bagian penting dari evaluasi mutu pekerjaan persiapan tanah, pondasi, serta lapisan perkerasan bawah dan atas pada konstruksi jalan dan bangunan. Kepadatan tanah yang sesuai standar menjamin kestabilan struktur, mencegah penurunan berlebih, dan meminimalkan risiko kerusakan akibat pergerakan tanah (Das & Sivakugan, 2017). Dua metode utama yang banyak digunakan dalam pengujian kepadatan lapangan adalah *Sand Cone Test* dan *Nuclear*

Density Test. Kedua metode ini memiliki prinsip dan prosedur yang berbeda, serta aplikasi yang sesuai dengan kondisi lapangan dan kebutuhan pengujian. Tujuan pengujian kepadatan adalah untuk memastikan bahwa tanah yang digunakan atau dikerjakan sudah mencapai tingkat pemadatan yang direncanakan agar stabil dan kuat.

1. Uji *Sand Cone* (Metode Kerucut Pasir)

Metode *sand cone* menggunakan prinsip mengukur volume lubang uji yang digali pada lapisan tanah dengan cara mengisi lubang tersebut dengan pasir standar yang sudah diketahui massa dan kepadatan pasirnya. Dengan mengetahui massa pasir yang masuk ke lubang dan volume lubang yang diisi, dapat dihitung kepadatan tanah asli.

a. Alat dan Bahan

- 1) Alat *sand cone* (tabung kerucut berisi pasir standar)
- 2) Peralatan penggali (sekop kecil, alat penggali manual)
- 3) Timbangan presisi
- 4) Wadah pasir standar yang sudah dikalibrasi
- 5) Oven pengering untuk uji kadar air (jika dilakukan di lapangan)

b. Prosedur Pelaksanaan

- 1) Menentukan lokasi uji dan membersihkan permukaan tanah dari material yang tidak homogen.
- 2) Menggali lubang uji tanah secara hati-hati dengan volume cukup besar untuk akurasi pengukuran.
- 3) Menimbang massa tanah dari lubang.
- 4) Menempatkan alat *sand cone* di atas lubang dan membuka katup untuk mengisi lubang dengan pasir standar.
- 5) Menimbang pasir yang masuk ke lubang (berdasarkan berat pasir awal dan berat sisa pasir).
- 6) Menghitung volume lubang berdasarkan massa pasir yang mengisi lubang dan kepadatan pasir.
- 7) Menghitung kepadatan basah tanah dengan membagi massa tanah dengan volume lubang.
- 8) Jika diperlukan, mengukur kadar air tanah dengan mengambil sampel tanah dari lubang untuk dikeringkan di oven.
- 9) Menghitung kepadatan kering menggunakan rumus:

$$\rho_d = \frac{\rho}{1 + w}$$

di mana:

- ρ_d = kepadatan kering (kg/m^3)
 - ρ = kepadatan basah (kg/m^3)
 - w = kadar air (%)
- c. Kelebihan Metode *Sand Cone*
- 1) Metode sederhana dan murah.
 - 2) Tidak memerlukan peralatan elektronik yang kompleks.
 - 3) Cocok untuk berbagai jenis tanah.
- d. Kekurangan Metode *Sand Cone*
- 1) Prosedur cukup memakan waktu dan tenaga.
 - 2) Tidak cocok untuk tanah berpasir halus atau berbutir kecil karena pasir dapat masuk ke celah tanah.
 - 3) Rentan kesalahan jika lubang penggalian tidak rapi atau pasir standar tidak kering sempurna.

2. Uji *Nuclear Density* (Metode Nuklir)

Metode *nuclear density* menggunakan prinsip pengukuran interaksi radiasi neutron dan gamma dari alat pengukur yang ditempatkan di atas permukaan tanah. Alat ini memancarkan neutron ke tanah, dan neutrons tersebut akan tersebar tergantung pada kadar air dan kepadatan tanah di bawah alat (Das & Sivakugan, 2017). Dengan kalibrasi yang tepat, alat ini dapat langsung memberikan nilai kepadatan basah dan kadar air tanpa harus mengambil sampel tanah.

- a. Alat dan Bahan
- 1) *Nuclear density gauge* (alat pengukur nuklir)
 - 2) Perlengkapan keselamatan radiasi
 - 3) Standar kalibrasi
 - 4) Alat bantu pengukuran dan catatan data
- b. Prosedur Pelaksanaan
- 1) Menentukan lokasi pengujian dan membersihkan permukaan.
 - 2) Meletakkan alat *nuclear density gauge* pada posisi pengukuran.
 - 3) Mengaktifkan alat dan membaca hasil pengukuran kepadatan basah dan kadar air langsung pada layar alat.
 - 4) Melakukan beberapa kali pengukuran untuk akurasi.

- 5) Membandingkan hasil pengukuran dengan nilai standar perencanaan.
- c. Kelebihan Metode Nuklir
 - 1) Pengukuran cepat dan efisien.
 - 2) Tidak perlu menggali lubang atau mengambil sampel tanah.
 - 3) Dapat digunakan di lapangan secara langsung dan berulang.
- d. Kekurangan Metode Nuklir
 - 1) Biaya alat relatif mahal.
 - 2) Memerlukan tenaga operator terlatih dan berizin untuk penggunaan alat radiasi.
 - 3) Pengukuran dapat terpengaruh oleh kondisi lingkungan sekitar seperti batuan keras atau kandungan material anomali.

3. Perbandingan Metode *Sand Cone* dan *Nuclear Density*

Aspek	<i>Sand Cone</i>	<i>Nuclear Density</i>
Kecepatan pengujian	Lambat (butuh waktu penggalian)	Cepat (langsung dapat hasil)
Biaya	Rendah	Tinggi
Akurasi	Tinggi jika prosedur tepat	Tinggi, namun perlu kalibrasi
Kemudahan penggunaan	Butuh tenaga manual dan hati-hati	Perlu operator terlatih dan berizin
Pengaruh lingkungan	Sensitif terhadap jenis tanah	Dapat terganggu oleh material keras atau anomali

4. Pentingnya Uji Kepadatan dalam Evaluasi Mutu Pekerjaan Tanah

Pengujian kepadatan tanah merupakan salah satu langkah paling krusial dalam evaluasi mutu pekerjaan tanah, khususnya dalam konstruksi jalan. Pemadatan tanah yang optimal sangat menentukan kestabilan dan daya dukung lapisan dasar yang menjadi fondasi perkerasan jalan. Jika tanah dasar tidak dipadatkan dengan benar, maka struktur perkerasan yang dibangun di atasnya akan rentan mengalami penurunan permukaan, retak, hingga kerusakan permanen yang dapat

memperpendek umur jalan. Oleh karena itu, pengujian kepadatan tanah menjadi kebutuhan mutlak untuk menjamin bahwa pekerjaan pemadatan memenuhi spesifikasi teknis yang ditetapkan dalam perencanaan (Budhu, 2015).

Pelaksanaan pengujian kepadatan biasanya dilakukan secara berkala selama proses konstruksi agar setiap lapisan tanah yang dipadatkan bisa dikontrol kualitasnya. Pengujian ini menggunakan metode dan alat tertentu seperti alat *sand cone*, nuclear densometer, atau metode lainnya sesuai dengan standar yang berlaku. Standar mutu yang sering dijadikan acuan dalam pengujian kepadatan tanah di Indonesia antara lain adalah Standar Nasional Indonesia (SNI) serta standar internasional seperti *American Association of State Highway and Transportation Officials* (AASHTO). Keduanya memberikan pedoman mengenai prosedur pengujian, alat yang digunakan, dan nilai kepadatan minimum yang harus dicapai agar tanah dianggap layak sebagai fondasi perkerasan.

Pengujian kepadatan juga berperan dalam meminimalkan risiko kerusakan struktural yang bisa muncul kemudian hari akibat pemadatan yang kurang baik. Tanah yang tidak cukup padat akan mudah mengalami penurunan saat menerima beban lalu lintas, yang berujung pada deformasi dan retak pada perkerasan. Dengan adanya pengujian, kontraktor dapat segera melakukan tindakan perbaikan apabila hasil pengujian menunjukkan bahwa kepadatan tanah belum mencapai standar yang disyaratkan. Hal ini tentu menghemat biaya perbaikan di masa mendatang dan memperpanjang masa pakai jalan.

5. Standar dan Pedoman Pengujian Kepadatan Tanah

- a. ASTM D6938: *Standard Test Method for In-Place Density and Water Content of Soil and Soil-Aggregate by Nuclear Methods (Shallow Depth)*.
- b. AASHTO T310: *Standard Method of Test for Density of Soil and Soil-Aggregate in Place by Nuclear Methods*.

Pemenuhan standar ini penting untuk hasil pengujian yang valid dan dapat dipertanggungjawabkan dalam proyek konstruksi jalan.

6. Studi Kasus dan Implementasi Lapangan

Proyek pembangunan jalan tol di Pulau Jawa menghadirkan tantangan teknis yang signifikan terkait dengan kualitas tanah dasar yang

beragam, mulai dari tanah lunak hingga zona dengan banyak batuan. Dalam konteks ini, pemilihan metode pengujian kepadatan tanah menjadi sangat penting untuk menjamin keakuratan data sekaligus efisiensi waktu pelaksanaan. Metode *nuclear density* dipilih sebagai metode utama dalam proyek ini karena mampu memberikan hasil pengujian secara cepat dan akurat tanpa harus melakukan penggalian yang luas. Keunggulan metode ini sangat membantu dalam pengawasan pekerjaan pemadatan yang berjalan secara kontinu dan dinamis di lapangan.

Mengingat karakteristik tanah yang heterogen dengan kandungan batuan yang cukup banyak di beberapa titik, penggunaan metode *nuclear density* tidak selalu dapat memberikan hasil yang sempurna. Untuk mengantisipasi hal ini, uji *sand cone* tetap dilakukan sebagai metode verifikasi tambahan. Metode *sand cone* yang bersifat manual dan lebih tradisional ini berfungsi untuk memastikan bahwa hasil pengujian kepadatan dari *nuclear density* tidak mengalami kesalahan, terutama pada zona dengan kondisi tanah yang sulit. Pendekatan kombinasi ini menunjukkan pemahaman yang matang oleh tim proyek akan pentingnya akurasi data dalam menjamin mutu pekerjaan pemadatan tanah.

Hasil pengujian dari kedua metode tersebut menunjukkan bahwa kepadatan tanah rata-rata yang dicapai mencapai 95% dari kepadatan maksimum standar Proctor. Angka ini merupakan indikator bahwa pekerjaan pemadatan telah memenuhi persyaratan teknis yang telah ditetapkan dalam dokumen perencanaan. Standar Proctor sendiri menjadi acuan penting dalam menentukan batas kepadatan optimal tanah yang harus dicapai agar tanah dasar memiliki kekuatan dan stabilitas memadai untuk menahan beban lalu lintas. Pencapaian nilai 95% ini menandakan bahwa tanah dasar memiliki daya dukung yang cukup untuk mendukung lapisan perkerasan yang akan dibangun di atasnya.

B. Uji Ketebalan Lapisan

Pengujian ketebalan lapisan merupakan salah satu aspek utama dalam evaluasi mutu konstruksi perkerasan jalan. Ketebalan lapisan perkerasan sangat memengaruhi kemampuan struktur jalan dalam menahan beban lalu lintas dan kondisi lingkungan, sehingga harus sesuai dengan perencanaan teknis (Mallick & El-Korchi, 2022). Lapisan

perkerasan yang terlalu tipis dapat menyebabkan kerusakan prematur seperti retak, deformasi plastis, atau bahkan kegagalan struktural. Sebaliknya, ketebalan berlebih dapat menyebabkan pemborosan material dan biaya. Oleh karena itu, pengujian ketebalan lapisan dilakukan untuk memastikan kesesuaian ketebalan pelaksanaan di lapangan dengan spesifikasi desain. Pengujian ketebalan lapisan dapat dilakukan dengan berbagai metode, antara lain:

1. Metode Eksplorasi Fisik (Penggalian)

Metode paling sederhana dan tradisional adalah penggalian langsung pada titik uji untuk mengukur ketebalan lapisan dengan pita ukur atau penggaris. Metode ini disebut juga metode "*test pit*".

- a. Kelebihan:
 - 1) Akurasi tinggi karena pengukuran langsung.
 - 2) Dapat mengetahui kondisi lapisan secara visual.
- b. Kekurangan:
 - 1) Merusak lapisan yang diuji.
 - 2) Memerlukan waktu dan tenaga cukup besar.
 - 3) Tidak praktis untuk pengujian area luas.
- c. Metode Eksplorasi Fisik
 - 1) Tentukan titik pengujian sesuai dengan rencana sampling.
 - 2) Gali tanah atau lapisan perkerasan hingga lapisan bawah terlihat.
 - 3) Ukur ketebalan setiap lapisan dengan alat ukur.
 - 4) Catat hasil pengukuran dan kondisi lapisan.

2. Metode Ultrasonik

Metode ini menggunakan gelombang ultrasonik untuk mengukur ketebalan lapisan secara non-destruktif. Gelombang ultrasonik dipancarkan ke lapisan, dan waktu tempuh gelombang pantul dianalisis untuk menentukan ketebalan.

- a. Kelebihan
 - 1) Tidak merusak lapisan.
 - 2) Dapat melakukan pengujian dengan cepat.
- b. Kekurangan
 - 1) Sensitif terhadap kondisi permukaan dan jenis material.
 - 2) Membutuhkan kalibrasi dan keahlian operator.

- c. Metode Ultrasonik
 - 1) Bersihkan permukaan lapisan yang diuji.
 - 2) Letakkan sensor ultrasonik pada permukaan.
 - 3) Kalibrasi alat sesuai jenis material.
 - 4) Lakukan pemancaran gelombang dan catat waktu tempuh.
 - 5) Hitung ketebalan berdasarkan kecepatan gelombang di material.

3. Metode Radar Penetrasi Tanah (*Ground Penetrating Radar - GPR*)

GPR adalah metode non-destruktif yang memanfaatkan gelombang elektromagnetik untuk mendeteksi ketebalan dan kondisi lapisan tanah serta material perkerasan (Joshaghani & Shokrabadi, 2022).

- a. Kelebihan
 - 1) Dapat melakukan pemetaan ketebalan secara luas dan cepat.
 - 2) Mendeteksi lapisan tersembunyi tanpa perlu penggalian.
- b. Kekurangan
 - 1) Memerlukan interpretasi data khusus.
 - 2) Pengaruh tinggi dari kandungan air dan jenis material.
- c. Metode GPR
 - 1) Persiapkan alat dan kalibrasi sesuai kondisi lapangan.
 - 2) Gerakkan alat GPR secara horizontal di permukaan yang diuji.
 - 3) Data gelombang direkam dan dianalisis menggunakan software.
 - 4) Interpretasikan hasil untuk mendapatkan ketebalan dan kondisi lapisan.

4. Metode Drilling / Coring

Metode ini melibatkan pengeboran atau pengambilan inti (*core sample*) dari lapisan perkerasan untuk pengukuran ketebalan secara langsung di laboratorium.

- a. Kelebihan
 - 1) Akurat dan dapat dilakukan untuk lapisan keras seperti beton.
 - 2) Memungkinkan uji tambahan seperti kuat tekan.
- b. Kekurangan

- 1) Merusak lapisan di titik pengeboran.
 - 2) Proses lambat dan biaya relatif tinggi.
- c. Metode Coring
- 1) Tentukan titik pengeboran.
 - 2) Gunakan mesin core drill untuk mengambil inti beton atau aspal.
 - 3) Ukur ketebalan lapisan dari inti yang diambil.
 - 4) Simpan dan analisa inti untuk uji tambahan jika diperlukan.

5. Contoh Implementasi di Lapangan

Pada proyek pembangunan jalan nasional di wilayah Jawa Barat, pengujian kualitas dan ketebalan lapisan perkerasan menjadi aspek penting untuk memastikan daya tahan dan keamanan jalan. Salah satu metode yang digunakan untuk pengujian ketebalan lapisan aspal adalah *Ground Penetrating Radar* (GPR). Metode non-destruktif ini memungkinkan identifikasi ketebalan lapisan aspal secara cepat dan akurat di seluruh segmen jalan tanpa perlu penggalian atau kerusakan pada struktur jalan. Dalam pelaksanaannya, GPR berhasil mengungkap beberapa area yang memiliki ketebalan aspal di bawah standar desain minimum, yaitu 7 cm. Temuan ini menjadi dasar bagi tim konstruksi untuk melakukan evaluasi lebih lanjut.

Setelah hasil pengujian GPR dianalisis, ditemukan bahwa ketebalan aspal yang kurang tersebut berpotensi mengurangi umur layanan perkerasan dan meningkatkan risiko kerusakan dini akibat beban lalu lintas. Oleh karena itu, dilakukan tindakan perbaikan dengan menambah lapisan aspal pada area yang bermasalah. Penambahan lapisan ini bertujuan agar ketebalan aspal sesuai dengan standar teknis yang telah ditetapkan, sehingga kestabilan dan kekuatan perkerasan dapat terjamin. Proses perbaikan ini juga menjadi contoh bagaimana penggunaan teknologi pengujian modern seperti GPR dapat meningkatkan kualitas pemeliharaan jalan serta mengoptimalkan biaya perbaikan.

Metode core drilling juga digunakan pada proyek ini, khususnya untuk memeriksa ketebalan lapisan beton perkerasan kaku. Metode ini bersifat destruktif karena melibatkan pengeboran inti beton, namun memberikan hasil yang sangat akurat mengenai ketebalan dan kondisi internal lapisan beton. Pengujian core drilling difokuskan pada titik-titik kritis seperti jembatan dan area dengan beban berat, di mana ketebalan

dan kualitas beton sangat menentukan performa struktur jalan. Hasil dari core drilling ini membantu memastikan bahwa perkerasan beton memenuhi spesifikasi desain dan tidak mengalami penurunan mutu selama konstruksi.

C. Marshall Test dan Uji Kelekatan

Pada bidang konstruksi jalan khususnya perkerasan lentur, mutu campuran aspal merupakan aspek vital yang harus dipastikan melalui serangkaian pengujian laboratorium dan lapangan. Dua metode utama yang umum digunakan untuk evaluasi mutu adalah Marshall Test dan Uji Kelekatan (*Adhesion Test*). Keduanya berperan penting dalam menjamin kualitas campuran aspal agar dapat menahan beban lalu lintas dan pengaruh lingkungan. Marshall Test dikenal luas sebagai metode standar untuk mengukur stabilitas dan kepadatan campuran aspal, sementara uji kelekatan bertujuan memastikan daya rekat antara agregat dan bahan pengikat aspal agar campuran tidak mudah terpisah atau rusak.

1. Marshall Test

Marshall Test adalah metode pengujian laboratorium untuk menentukan stabilitas maksimum, aliran (*flow*), dan kepadatan campuran aspal dengan tujuan untuk mengetahui kualitas dan karakteristik fisik campuran yang dibuat. Tujuan utama Marshall Test adalah:

- a. Menentukan kandungan aspal optimum (*Optimum Asphalt Content - OAC*).
- b. Menilai stabilitas campuran terhadap beban tekan.
- c. Mengukur deformasi campuran (*flow*) saat diberi beban.
- d. Menentukan kepadatan dan porositas campuran.
 - 1) Persiapan Sampel
 - a) Sampel campuran aspal dibuat sesuai dengan proporsi bahan yang direncanakan.
 - b) Sampel kemudian dipadatkan dalam cetakan Marshall dengan jumlah pukulan yang telah ditentukan (biasanya 75 pukulan per sisi).
 - c) Setelah pemadatan, sampel dipotong dan didiamkan untuk stabilisasi suhu.

- 2) Pengujian Stabilitas dan Flow
 - a) Sampel ditempatkan pada mesin uji Marshall.
 - b) Mesin memberikan beban tekan vertikal dengan kecepatan konstan 50,8 mm/menit.
 - c) tabilitas adalah nilai beban maksimum sebelum sampel mengalami kerusakan.
 - d) Flow adalah deformasi yang terjadi pada sampel sampai mencapai beban maksimum, diukur dalam satuan 0,25 mm.
- 3) Perhitungan Kepadatan dan Porositas
 - a) Kepadatan campuran dihitung berdasarkan berat dan volume sampel.
 - b) Porositas dihitung untuk mengetahui ruang kosong dalam campuran yang mempengaruhi daya tahan.
- 4) Interpretasi Hasil Marshall Test
 Nilai-nilai yang diperoleh dari Marshall Test digunakan untuk:
 - a) Menentukan kandungan aspal optimum yang memberikan stabilitas dan flow terbaik.
 - b) Memastikan campuran memiliki kekuatan cukup untuk menahan beban lalu lintas.
 - c) Menghindari nilai flow yang terlalu tinggi (berisiko deformasi berlebih) atau terlalu rendah (bisa menyebabkan keretakan). Memastikan porositas dalam rentang yang optimal agar daya tahan campuran maksimal
 - d) Nilai-nilai kriteria biasanya merujuk pada standar SNI atau AASHTO.

2. Uji Kelekatan (*Adhesion Test*)

Uji kelekatan mengukur kemampuan bahan pengikat (aspal) untuk melekat pada permukaan agregat sehingga membentuk campuran yang homogen dan tahan terhadap pemisahan. Kelekatan yang buruk dapat menyebabkan masalah serius seperti:

- a. *Stripping*: terlepasnya bahan pengikat dari agregat akibat air atau kelembaban.
- b. Pengurangan umur perkerasan.
- c. Penurunan kemampuan menahan beban.

Faktor yang mempengaruhi kelekatan:

- a. Jenis agregat: permukaan kasar dan bersih meningkatkan adhesi.
- b. Kualitas bahan pengikat: aspal dengan sifat adhesif baik.
- c. Kondisi permukaan agregat: adanya minyak, debu, atau kelembaban mengurangi kelekatan.
- d. Adanya aditif anti-stripping: bahan tambahan seperti lime atau silika dapat meningkatkan adhesi.

Beberapa metode yang digunakan untuk uji kelekatan antara lain:

1) Metode Uji Laboratorium Visual

Uji kelekatan (*adhesion test*) merupakan salah satu metode penting dalam laboratorium untuk menilai kualitas ikatan antara agregat dan aspal pada campuran perkerasan jalan. Salah satu pendekatan yang sering digunakan adalah uji visual yang melibatkan perendaman sampel campuran dalam air. Prosedur ini bertujuan mensimulasikan kondisi kelembaban yang mungkin terjadi di lapangan, sehingga dapat diketahui seberapa kuat ikatan antara agregat dan aspal saat terpapar air. Uji dilakukan pada suhu tertentu yang sudah distandarisasi dan dalam durasi waktu yang telah ditetapkan, misalnya 24 jam pada suhu 60°C, untuk mempercepat reaksi pelepasan aspal dari permukaan agregat. Setelah perendaman selesai, sampel kemudian diamati secara visual untuk mendeteksi adanya tanda-tanda pemisahan antara aspal dan agregat, yang disebut stripping. Stripping merupakan fenomena di mana lapisan aspal yang melekat pada agregat terkelupas akibat pengaruh air, sehingga dapat mengurangi kekuatan ikatan dan menyebabkan kerusakan pada perkerasan seperti retak atau pengelupasan. Dalam uji ini, pengamatan visual dilakukan untuk menilai tingkat kelekatan dengan memperhatikan apakah permukaan agregat masih tertutup lapisan aspal atau sudah banyak bagian yang terbuka karena terkelupas.

Hasil dari uji visual ini sangat penting untuk menentukan kualitas campuran aspal dan ketahanan perkerasan terhadap pengaruh air. Jika ditemukan adanya stripping yang signifikan, maka perlu dilakukan evaluasi kembali terhadap komposisi campuran, penggunaan bahan tambahan anti-stripping, atau pemilihan agregat yang lebih sesuai. Uji ini

membantu insinyur jalan untuk memprediksi daya tahan perkerasan di lapangan, khususnya pada daerah dengan kondisi kelembaban tinggi, sehingga dapat mengurangi risiko kegagalan struktur jalan yang disebabkan oleh lepasnya ikatan antara aspal dan agregat.

2) Metode *Tensile Strength Ratio* (TSR)

Metode *Tensile Strength Ratio* (TSR) merupakan salah satu prosedur uji kelekatan yang digunakan untuk mengukur daya tahan ikatan antara agregat dan aspal dalam campuran perkerasan jalan ketika terpapar air. TSR dilakukan dengan membandingkan kekuatan tarik campuran aspal yang telah direndam dalam air dengan campuran yang tidak direndam. Proses ini mensimulasikan kondisi lapangan di mana perkerasan sering mengalami siklus basah dan kering akibat hujan atau kelembaban lingkungan, sehingga dapat menilai kemampuan campuran mempertahankan kekuatan tariknya dalam kondisi basah.

Pada pelaksanaan uji TSR, sampel campuran aspal dibagi menjadi dua kelompok. Kelompok pertama direndam dalam air pada suhu tertentu selama waktu yang ditetapkan, biasanya 24 jam pada suhu sekitar 60°C, untuk mensimulasikan efek kelembaban. Kelompok kedua tidak direndam dan berfungsi sebagai kontrol. Setelah proses perendaman, kedua kelompok diuji kekuatan tariknya menggunakan alat uji tarik khusus. Hasil pengujian kemudian digunakan untuk menghitung nilai TSR sebagai persentase dari kekuatan tarik campuran basah dibandingkan dengan kekuatan tarik campuran kering.

3) Metode Uji Tensi Pull-off

Metode uji tensi pull-off adalah salah satu teknik yang digunakan untuk mengukur kekuatan ikatan antara aspal dan agregat dalam campuran perkerasan. Pengujian ini berfokus pada pengukuran gaya tarik maksimum yang dapat diterima oleh ikatan tersebut sebelum terjadi pemisahan atau terlepas. Dengan metode ini, dapat diketahui seberapa kuat adhesi antara bahan penyusun perkerasan, yang sangat penting untuk memastikan daya tahan dan umur layanan jalan.

Pada pelaksanaan uji tensi pull-off, sampel campuran aspal dan agregat disiapkan dengan ukuran dan bentuk tertentu. Sebuah alat khusus yang dapat memberikan gaya tarik vertikal dipasang pada permukaan sampel. Kemudian gaya tarik tersebut secara bertahap ditingkatkan hingga ikatan antara aspal dan agregat mengalami kegagalan dan terjadi pelepasan. Besarnya gaya tarik maksimum yang dicapai saat ikatan tersebut terputus dicatat sebagai nilai kekuatan adhesi. Hasil ini memberikan indikasi langsung tentang kemampuan campuran dalam mempertahankan kelekatan saat menerima beban tarik, terutama dalam kondisi lingkungan yang mungkin mempengaruhi adhesi.

3. Pentingnya Pengujian Marshall dan Kelekatan dalam Konstruksi Jalan

Pengujian Marshall dan uji kelekatan merupakan dua aspek penting dalam proses quality control campuran aspal yang digunakan dalam konstruksi jalan. Pengujian Marshall bertujuan untuk menentukan proporsi campuran aspal dan agregat yang paling optimal sehingga menghasilkan perkerasan dengan kekuatan dan stabilitas yang baik. Sementara itu, uji kelekatan mengukur kemampuan ikatan antara aspal dan agregat, yang sangat penting untuk menjaga integritas struktural perkerasan. Keduanya bersama-sama memastikan bahwa campuran aspal yang digunakan memenuhi persyaratan desain yang telah ditetapkan (Shu *et al.*, 2022).

Dengan campuran yang memenuhi syarat desain melalui pengujian Marshall, perkerasan jalan akan memiliki ketahanan yang tinggi terhadap deformasi yang diakibatkan oleh beban lalu lintas yang terus-menerus. Hal ini sangat penting karena jalan harus mampu menahan tekanan dan gaya geser dari kendaraan tanpa mengalami perubahan bentuk permanen yang dapat mengurangi kenyamanan dan keselamatan pengguna jalan. Selain itu, uji kelekatan membantu memastikan bahwa aspal dan agregat tetap terikat dengan kuat meskipun menghadapi perubahan suhu dan kelembapan yang ekstrem, sehingga mengurangi risiko terjadinya kerusakan akibat pemisahan material.

D. Defleksi, Kekasaran, dan Daya Dukung Perkerasan

Evaluasi mutu dan kondisi perkerasan jalan merupakan aspek penting untuk menjamin keselamatan, kenyamanan, dan keandalan jaringan jalan. Di antara parameter utama yang sering digunakan untuk menilai kondisi dan performa perkerasan adalah defleksi, kekasaran permukaan, dan daya dukung perkerasan. Ketiga parameter ini saling berkaitan dan memberikan gambaran lengkap mengenai keadaan fisik dan struktural perkerasan jalan. Defleksi menilai respons struktural perkerasan terhadap beban, kekasaran menggambarkan kondisi permukaan yang berdampak pada kenyamanan dan keselamatan, sementara daya dukung mengindikasikan kemampuan perkerasan dalam menahan beban lalu lintas. Penilaian dan pengujian lapangan untuk ketiga parameter ini sangat penting dalam perencanaan pemeliharaan dan rehabilitasi jalan (Papagiannakis & Masad, 2024).

1. Defleksi Perkerasan

Defleksi perkerasan adalah besarnya lendutan atau deformasi vertikal yang terjadi pada permukaan perkerasan akibat beban kendaraan. Defleksi ini merupakan indikator utama untuk menilai kondisi struktural lapisan perkerasan dan *Subgrade*. Defleksi yang berlebihan biasanya menandakan kerusakan struktural atau penurunan daya dukung jalan. Pengukuran defleksi memberikan informasi penting untuk:

- a. Menilai kondisi struktur perkerasan.
- b. Menentukan kebutuhan rehabilitasi atau perbaikan.
- c. Mengetahui distribusi beban pada lapisan perkerasan.
- d. Mengestimasi umur layanan perkerasan.

Beberapa metode pengukuran defleksi yang umum digunakan di lapangan adalah:

- a. *Benkelman Beam Deflection Test*

Benkelman Beam Deflection Test merupakan salah satu metode yang umum digunakan untuk mengukur defleksi elastis pada perkerasan lentur. Defleksi elastis ini merupakan lendutan yang terjadi pada permukaan perkerasan akibat beban kendaraan yang melintas. Pengukuran defleksi sangat penting karena dapat memberikan informasi mengenai kondisi struktural perkerasan serta kemampuannya menahan beban tanpa mengalami

kerusakan permanen. Dengan mengetahui besarnya defleksi, para insinyur dapat menilai apakah perkerasan masih mampu berfungsi secara optimal atau sudah memerlukan perbaikan.

Prinsip kerja Benkelman Beam sangat sederhana, yaitu menggunakan alat berupa balok panjang yang ditempatkan pada titik tertentu di permukaan perkerasan. Saat kendaraan melewati titik pengukuran, alat ini akan mencatat lendutan atau defleksi yang terjadi. Besarnya defleksi diukur dengan presisi tinggi menggunakan skala atau sensor yang terpasang pada alat. Data yang diperoleh dari pengujian ini kemudian dianalisis untuk menentukan tingkat keausan perkerasan serta memperkirakan umur layanan yang tersisa dari jalan tersebut.

b. *Falling Weight Deflectometer (FWD)*

Falling Weight Deflectometer (FWD) merupakan metode modern yang banyak digunakan untuk mengukur defleksi pada perkerasan jalan. Prinsip kerja FWD adalah dengan menjatuhkan beban tertentu secara tiba-tiba pada permukaan perkerasan untuk menghasilkan impuls beban. Impuls ini mensimulasikan beban kendaraan yang melintas, sehingga memungkinkan pengukuran respons elastis perkerasan secara akurat. Dengan menggunakan sensor seperti geophone atau accelerometer yang dipasang di beberapa titik permukaan, FWD mampu sm defleksi yang terjadi akibat beban tersebut secara simultan dan detail (Sanjay *et al.*, 2022).

Keunggulan utama dari metode FWD adalah kemampuannya memberikan data defleksi yang sangat representatif dan komprehensif. Data yang diperoleh tidak hanya menunjukkan besarnya defleksi pada satu titik saja, melainkan juga distribusi defleksi pada berbagai lokasi di sekitar titik beban. Hal ini memungkinkan analisis yang lebih mendalam terhadap kondisi struktural perkerasan, termasuk identifikasi lapisan perkerasan yang mengalami kelemahan atau kerusakan. Selain itu, FWD dapat diaplikasikan pada berbagai jenis perkerasan, baik lentur maupun kaku, sehingga menjadi alat evaluasi yang sangat fleksibel.

c. *Static Plate Load Test*

Static Plate Load Test adalah metode pengujian yang digunakan untuk mengukur defleksi dan tekanan pada lapisan tanah dasar,

khususnya pada *Subgrade* dan pondasi jalan. Tes ini dilakukan dengan memberikan beban statis pada sebuah plat baja yang diletakkan di permukaan tanah, kemudian mengukur penurunan atau defleksi tanah di bawah plat tersebut. Data yang diperoleh dari pengujian ini sangat penting untuk menilai daya dukung tanah dan kestabilan lapisan dasar jalan sebelum dilakukan pembangunan struktur perkerasan.

Pada pelaksanaannya, plat beban yang memiliki ukuran dan berat tertentu ditempatkan secara merata di atas permukaan tanah yang akan diuji. Beban diberikan secara bertahap dan penurunan tanah di bawah plat dicatat pada setiap tahap beban menggunakan alat ukur presisi. Hasil pengujian ini kemudian dianalisis untuk menentukan modulus reaksi tanah dan kemampuan tanah menahan beban. Nilai ini menjadi acuan penting dalam merancang ketebalan lapisan perkerasan dan pondasi agar struktur jalan dapat menahan beban lalu lintas dengan baik tanpa mengalami kerusakan dini.

2. Kekasaran Permukaan Jalan

Kekasaran permukaan (*surface roughness*) adalah kondisi permukaan jalan yang memengaruhi kenyamanan berkendara, keamanan, dan konsumsi bahan bakar. Kekasaran diukur untuk mengetahui tingkat kehalusan permukaan jalan serta untuk mengidentifikasi kerusakan permukaan seperti retak, lubang, dan deformasi. Kekasaran berhubungan langsung dengan:

- a. Keselamatan pengguna jalan.
- b. Pengendalian kendaraan.
- c. Keausan kendaraan dan jalan.
- d. Konsumsi energi dan emisi kendaraan.

Pengukuran kekasaran dilakukan dengan beberapa metode, antara lain:

- a. *International Roughness Index* (IRI)

International Roughness Index (IRI) adalah standar internasional yang digunakan untuk mengukur kekasaran permukaan jalan secara kuantitatif dan konsisten. IRI mengukur perubahan vertikal yang dialami oleh kendaraan saat melewati jalan sepanjang satu kilometer. Nilai IRI dinyatakan dalam satuan

meter per kilometer (m/km), yang menggambarkan tingkat ketidakrataan atau kekasaran jalan. Semakin tinggi nilai IRI, semakin kasar dan tidak nyaman permukaan jalan tersebut untuk dilalui (FHWA, 2017).

b. Profilometer Mekanik

Profilometer mekanik merupakan salah satu alat tradisional yang digunakan untuk mengukur kekasaran permukaan jalan dengan cara yang relatif sederhana. Alat ini bekerja dengan menggunakan roda pengukur yang bergerak mengikuti kontur atau profil permukaan jalan. Ketika alat ini ditarik sepanjang permukaan jalan, roda pengukur akan mencatat variasi elevasi atau ketinggian permukaan jalan secara mekanis. Hasil pengukuran ini menunjukkan fluktuasi vertikal yang terjadi, yang kemudian dianalisis untuk mengetahui tingkat kekasaran.

c. Laser Profilometer dan Inertial Profilers

Laser profilometer dan inertial profilers adalah alat modern yang digunakan untuk mengukur kekasaran permukaan jalan dengan tingkat presisi tinggi. Teknologi ini menggunakan sinar laser yang ditembakkan ke permukaan jalan untuk merekam perbedaan elevasi secara detail. Selain itu, inertial profiler dilengkapi dengan akselerometer dan sensor kecepatan yang bekerja bersamaan untuk mengoreksi pengaruh gerakan kendaraan selama pengukuran. Dengan demikian, alat ini mampu menghasilkan data profil longitudinal jalan yang akurat meskipun dalam kondisi kendaraan bergerak.

Standar penilaian IRI memberikan batasan kualitas permukaan,

contohnya:

Kategori Jalan	Nilai IRI (m/km)	Keterangan
Sangat Baik	0 - 1.5	Permukaan sangat halus
Baik	1.5 - 2.5	Halus
Sedang	2.5 - 4.0	Kekasaran mulai terasa
Buruk	> 4.0	Perlu perbaikan segera

Kekasaran yang tinggi berdampak negatif terhadap kenyamanan dan dapat menjadi indikasi awal kerusakan permukaan.

3. Daya Dukung Perkerasan

Daya dukung perkerasan adalah kemampuan lapisan jalan untuk menahan beban lalu lintas tanpa mengalami kerusakan struktural permanen. Daya dukung ini sangat dipengaruhi oleh kekuatan dan ketebalan lapisan perkerasan serta kondisi tanah dasar. Daya dukung memengaruhi:

- a. Ketahanan terhadap deformasi permanen (rutting).
- b. Ketahanan terhadap retak dan kelelahan.
- c. Umur layanan jalan.

Metode umum untuk mengukur daya dukung meliputi:

1) *California Bearing Ratio* (CBR)

California Bearing Ratio (CBR) adalah metode pengujian laboratorium maupun lapangan yang digunakan untuk menilai daya dukung tanah dasar atau lapisan pondasi dalam konstruksi jalan. Pengujian ini dilakukan dengan cara menekan penetrasi piston standar ke dalam sampel tanah yang telah dipadatkan dengan beban tertentu dan membandingkan hasilnya dengan nilai standar dari batu pecah (*crushed stone*). Nilai CBR dinyatakan dalam persen dan menggambarkan seberapa besar kemampuan tanah untuk menahan beban dibandingkan dengan material acuan (Das & Sivakugan, 2017).

2) Modulus Resilient dan Modulus Elastis

Modulus Resilient (MR) dan Modulus Elastis adalah parameter penting dalam mengevaluasi daya dukung lapisan perkerasan dan tanah dasar (*Subgrade*). MR menggambarkan kemampuan material jalan untuk kembali ke bentuk semula setelah menerima beban berulang, seperti lalu lintas kendaraan, sedangkan Modulus Elastis mencerminkan hubungan antara tegangan dan regangan dalam kondisi linier elastis. Kedua parameter ini memberikan informasi kritis mengenai kinerja struktural perkerasan jalan dalam jangka panjang dan digunakan secara luas dalam analisis serta perencanaan ulang perkerasan.

3) *Plate Load Test*

Plate Load Test (PLT) merupakan metode pengujian lapangan yang digunakan untuk mengukur deformasi tanah akibat pembebanan vertikal, dan secara langsung menilai

daya dukung lapisan tanah dasar (*Subgrade*). Pengujian ini dilakukan dengan meletakkan pelat baja berbentuk bulat atau persegi di atas permukaan tanah, kemudian diberi beban secara bertahap menggunakan sistem hidrolik atau beban mati. Setiap kenaikan beban akan diikuti dengan pengukuran penurunan (deformasi) pelat, yang dicatat menggunakan dial gauge atau sensor digital.

4. Hubungan Defleksi, Kekasaran, dan Daya Dukung dalam Evaluasi Perkerasan

Ketiga parameter ini saling terkait dan memberikan gambaran menyeluruh tentang kondisi dan kinerja perkerasan jalan:

- a. Defleksi menunjukkan respon struktural terhadap beban dan menandai adanya kelemahan pada lapisan perkerasan atau tanah dasar.
- b. Kekasaran menunjukkan kondisi permukaan yang memengaruhi kenyamanan dan keselamatan.
- c. Daya dukung menunjukkan kapasitas perkerasan dalam menahan beban dan prediksi umur jalan.

Pengukuran defleksi dapat mendeteksi kerusakan awal yang belum tampak pada permukaan sehingga dapat mencegah peningkatan kekasaran. Sebaliknya, peningkatan kekasaran menjadi indikator bahwa defleksi berlebihan dan penurunan daya dukung telah terjadi (Loprencipe & Zoccali, 2017).



BAB X

PERAWATAN DAN REHABILITASI

JALAN

Aspek penting dalam menjaga kualitas dan fungsi jalan melalui perawatan dan rehabilitasi. Perawatan jalan bertujuan memperpanjang umur perkerasan dengan tindakan yang dilakukan secara rutin maupun berkala, seperti pembersihan drainase, penambalan lubang kecil, dan pengisian retak. Sementara rehabilitasi diperlukan saat kondisi jalan telah mengalami kerusakan signifikan, yang melibatkan perbaikan atau penggantian lapisan perkerasan agar kembali memenuhi standar teknis dan keselamatan. Strategi ini penting untuk menjaga efisiensi transportasi serta mengurangi biaya perbaikan besar di masa depan.

Pada pelaksanaan perawatan dan rehabilitasi, pemilihan metode harus didasarkan pada jenis dan tingkat kerusakan jalan. Kerusakan yang umum meliputi retak, lubang, deformasi, dan alur permukaan yang dapat mengganggu kenyamanan dan keselamatan pengguna jalan. Metode perawatan meliputi *overlay*, sealing, patching, dan rekonstruksi sebagian atau penuh, dengan pendekatan yang menyesuaikan kondisi lokal dan sumber daya yang tersedia. Teknologi modern seperti penggunaan material daur ulang dan *overlay* dingin juga semakin diterapkan untuk efisiensi dan ramah lingkungan.

A. Jenis-jenis Kerusakan Jalan

Kerusakan jalan merupakan salah satu faktor utama yang menurunkan kenyamanan, keselamatan, dan efisiensi transportasi. Oleh sebab itu, identifikasi jenis dan penyebab kerusakan jalan merupakan langkah penting dalam proses perawatan dan rehabilitasi jalan. Kerusakan yang umum dijumpai meliputi retak, lubang (*pothole*), dan alur (*rutting*). Setiap jenis kerusakan memiliki karakteristik dan mekanisme kerusakan yang berbeda sehingga membutuhkan metode

penanganan khusus (Titus-Glover *et al.*, 2019). Kerusakan jalan dapat terjadi karena kombinasi beberapa faktor berikut:

1. Beban Lalu Lintas: Volume dan berat kendaraan yang melewati jalan memengaruhi tingkat keausan dan kelelahan perkerasan (AASHTO, 2018).
2. Kualitas Material dan Pelaksanaan: Material yang kurang memenuhi standar serta teknik pelaksanaan yang tidak sesuai menyebabkan struktur perkerasan lebih cepat rusak.
3. Faktor Lingkungan: Siklus perubahan suhu, hujan, dan genangan air dapat menyebabkan deformasi, pelapukan, dan kerusakan permukaan.
4. Drainase yang Buruk: Air yang tidak terbuang dengan baik menyebabkan pelunakan lapisan tanah dasar dan mempercepat kerusakan.

Kerusakan jalan yang tidak segera diperbaiki menimbulkan beberapa dampak negatif:

1. Penurunan kenyamanan dan keselamatan pengguna jalan.
 2. Peningkatan risiko kecelakaan.
 3. Kerusakan kendaraan lebih cepat.
 4. Efisiensi transportasi menurun.
 5. Biaya perawatan dan rehabilitasi yang lebih besar jika kerusakan memburuk.
- a. Retak (*Cracking*)

Retak merupakan jenis kerusakan paling umum pada perkerasan jalan, yang terbentuk akibat berbagai faktor seperti kelelahan material, deformasi, atau pengaruh lingkungan. Retak dapat terbagi menjadi beberapa tipe, di antaranya:

1) Retak Lapis Tipis (*Alligator Cracking / Fatigue Cracking*)

Retak lapis tipis atau yang dikenal dengan istilah alligator cracking merupakan bentuk kerusakan pada perkerasan lentur yang ditandai oleh pola retak bercabang menyerupai kulit buaya. Jenis retakan ini umumnya disebabkan oleh kelelahan material perkerasan akibat beban berulang dari kendaraan berat yang melintasi jalan secara terus-menerus. Beban yang melebihi kapasitas struktur perkerasan menyebabkan tegangan tarik berulang di bagian bawah lapisan aspal, yang pada akhirnya memicu terbentuknya

retakan mikro yang kemudian berkembang menjadi pola retakan yang lebih kompleks (Mousa *et al.*, 2018).

2) Retak Memanjang (*Longitudinal Cracking*)

Retak memanjang (*longitudinal cracking*) adalah jenis kerusakan yang muncul sejajar dengan arah lalu lintas pada permukaan perkerasan jalan. Retakan ini sering kali terjadi pada garis sambungan antar lajur atau di sepanjang jalur roda kendaraan. Penyebab utama retak memanjang antara lain pergerakan atau pergeseran sambungan antar lapisan perkerasan, perubahan suhu yang ekstrem (ekspansi dan kontraksi termal), serta penurunan atau ketidakstabilan pondasi jalan. Perubahan suhu yang berulang menyebabkan tegangan tarik dan tekan pada lapisan aspal, sehingga struktur jalan menjadi retak.

3) Retak Melintang (*Transverse Cracking*)

Retak melintang (*transverse cracking*) merupakan jenis retakan yang memotong jalur lalu lintas secara tegak lurus atau hampir tegak lurus terhadap arah kendaraan. Retak ini umumnya muncul akibat perubahan suhu yang drastis, terutama penyusutan material perkerasan seperti aspal atau beton ketika terjadi penurunan suhu secara signifikan. Pada malam hari atau musim dingin, material menyusut dan membentuk tegangan tarik yang jika melebihi kekuatan tarik material, akan menimbulkan retakan. Retak ini sering muncul secara berkala di sepanjang jalan, terutama pada perkerasan dengan umur lebih tua atau yang memiliki campuran aspal kurang lentur.

4) Retak Blok (*Block Cracking*)

Retak blok (*block cracking*) merupakan jenis kerusakan yang ditandai dengan munculnya retakan berbentuk pola geometris menyerupai blok-blok atau persegi panjang di permukaan perkerasan jalan. Retakan ini biasanya memiliki ukuran yang bervariasi dan saling terhubung membentuk jaringan. Penyebab utama retak blok adalah penuaan material aspal akibat paparan sinar matahari, suhu tinggi, dan oksidasi dalam jangka panjang, yang mengakibatkan kehilangan elastisitas aspal. Seiring waktu, aspal menjadi

lebih kaku dan rentan terhadap tegangan akibat perubahan suhu harian, sehingga muncullah retakan.

5) Retak Sambungan (*Edge Cracking*)

Retak sambungan (*edge cracking*) adalah jenis kerusakan yang muncul di sepanjang tepi perkerasan jalan, terutama di jalur yang tidak memiliki bahu jalan yang stabil atau sistem drainase yang memadai. Retakan ini biasanya sejajar dengan arah lalu lintas dan dapat berkembang secara bertahap menjadi lebih lebar dan dalam jika tidak segera diperbaiki. Salah satu penyebab utamanya adalah penurunan atau erosi tanah di pinggir jalan yang menyebabkan kurangnya penopang struktural, sehingga tepi perkerasan tidak mampu menahan beban lalu lintas secara optimal.

b. Lubang (*Pothole*)

Lubang adalah kerusakan berupa rongga atau lubang di permukaan jalan yang disebabkan oleh pengelupasan material akibat faktor mekanik dan lingkungan. Lubang merupakan masalah serius karena dapat membahayakan keselamatan pengendara dan merusak kendaraan. Penyebab lubang:

1) Infiltrasi Air

Lubang (*pothole*) pada permukaan jalan merupakan kerusakan yang umum terjadi akibat infiltrasi air ke dalam lapisan perkerasan. Air yang meresap melalui retakan atau sambungan yang terbuka dapat mencapai lapisan bawah atau tanah dasar (*Subgrade*), terutama jika sistem drainase tidak berfungsi dengan baik. Ketika air masuk dan bertahan dalam waktu lama, material di bawah permukaan akan melunak, kehilangan daya dukung, dan menjadi rentan terhadap beban lalu lintas yang berulang. Pelunakan ini menyebabkan lapisan permukaan aspal tidak lagi memiliki fondasi yang kuat sehingga mulai mengalami pergeseran, retak, dan akhirnya membentuk lubang.

2) Beban Lalu Lintas Berlebihan

Beban lalu lintas berlebihan, terutama dari kendaraan berat seperti truk muatan besar, menjadi salah satu penyebab utama terbentuknya lubang (*pothole*) pada perkerasan jalan. Ketika beban melebihi kapasitas rancang lapisan perkerasan,

terjadi tekanan tinggi yang menyebabkan deformasi permanen pada struktur jalan. Tekanan ini tidak hanya merusak lapisan permukaan, tetapi juga memengaruhi kestabilan lapisan bawah. Jika kondisi ini terjadi terus-menerus tanpa adanya pemeliharaan rutin, perkerasan akan kehilangan daya dukungnya dan mulai retak, yang pada akhirnya menyebabkan pengelupasan dan terbentuknya lubang.

3) Kualitas Material dan Pelaksanaan yang Buruk

Kualitas material yang rendah dan pelaksanaan konstruksi yang tidak sesuai spesifikasi teknis merupakan faktor signifikan yang mempercepat munculnya lubang (pothole) pada perkerasan jalan. Material aspal atau agregat yang tidak memenuhi standar kekuatan dan kelekatan akan menyebabkan struktur perkerasan mudah retak dan terkelupas saat menghadapi beban lalu lintas dan perubahan cuaca. Selain itu, campuran aspal yang tidak homogen atau kandungan air berlebih saat proses pencampuran dan pemadatan juga berdampak negatif terhadap daya tahan lapisan jalan.

c. Alur (*Rutting*)

Alur adalah deformasi permanen berupa lekukan longitudinal pada jalur lalu lintas akibat deformasi material perkerasan. Alur ini sangat berbahaya karena dapat menyebabkan aquaplaning dan kecelakaan. Penyebab alur:

1) Deformasi Plastik pada Lapisan Aspal

Alur (*rutting*) pada perkerasan lentur merupakan salah satu bentuk kerusakan struktural yang terjadi akibat deformasi plastis pada lapisan aspal, terutama di jalur roda kendaraan. Ketika beban lalu lintas yang berat melewati jalan secara berulang, struktur lapisan aspal tidak mampu sepenuhnya kembali ke bentuk semula. Akibatnya, terjadi penurunan permanen pada lapisan permukaan yang membentuk alur memanjang sesuai arah lintasan roda (Titus-Glover *et al.*, 2019). Kondisi ini diperparah oleh suhu tinggi yang menyebabkan viskositas aspal menurun, sehingga aspal menjadi lebih lunak dan mudah mengalami deformasi.

2) Penurunan Kualitas *Subgrade*

Penurunan kualitas *Subgrade* atau tanah dasar merupakan salah satu penyebab utama terbentuknya alur (*rutting*) pada perkerasan jalan. *Subgrade* yang tidak memiliki daya dukung memadai tidak mampu menahan beban kendaraan secara berulang, sehingga terjadi penurunan permukaan jalan secara bertahap. Beban lalu lintas yang tinggi, terutama dari kendaraan berat, akan mempercepat proses deformasi ini jika struktur tanah di bawah perkerasan mengalami kelemahan struktural atau kelembaban yang berlebihan. Ketika tanah dasar kehilangan kekuatan atau mengalami konsolidasi, tekanan dari atas akan menyebabkan lapisan perkerasan tenggelam mengikuti bentuk deformasi di bawahnya.

3) Drainase Buruk

Drainase yang buruk merupakan salah satu faktor utama yang mempercepat terjadinya alur (*rutting*) pada perkerasan jalan. Ketika air tidak dapat dialirkan dengan baik dari permukaan maupun dari bawah lapisan perkerasan, air tersebut akan menggenang dan meresap ke dalam struktur perkerasan. Akibatnya, lapisan bawah seperti subbase dan *Subgrade* menjadi jenuh air, sehingga kehilangan kekuatannya. Kondisi ini membuat lapisan-lapisan tersebut lebih mudah mengalami deformasi saat menerima beban lalu lintas yang berulang. Alur yang terbentuk pun semakin dalam dari waktu ke waktu, terutama pada jalur roda kendaraan berat. Selain menyebabkan pelunakan material, genangan air juga dapat mempercepat proses kerusakan termal dan kimiawi pada campuran aspal. Air yang terjebak di dalam perkerasan dapat mengurangi daya lekat antara aspal dan agregat, sehingga mempercepat kegagalan struktural.

d. Strategi Perawatan dan Rehabilitasi

Pencegahan dan penanganan kerusakan jalan harus dilakukan secara sistematis dengan pendekatan sebagai berikut:

1) Perawatan Preventif

Perawatan preventif merupakan strategi penting dalam manajemen infrastruktur jalan yang bertujuan untuk memperpanjang umur layanan perkerasan sebelum terjadi

kerusakan yang lebih parah. Perawatan ini dilakukan secara rutin untuk menjaga kondisi fungsional jalan dan mencegah berkembangnya kerusakan struktural. Salah satu tindakan perawatan preventif yang paling umum adalah penyegelan retak. Retak-retak kecil pada permukaan aspal, jika tidak segera ditangani, dapat menjadi jalur masuk air ke dalam lapisan perkerasan. Hal ini mempercepat proses pelapukan dan menurunkan kekuatan struktur jalan (Mousa *et al.*, 2018).

2) Perawatan Kuratif

Perawatan kuratif merupakan strategi penanganan kerusakan jalan yang bersifat reaktif, yaitu dilakukan setelah kerusakan pada perkerasan telah terjadi dan mencapai tingkat yang mengganggu fungsi serta kenyamanan jalan. Berbeda dengan perawatan preventif yang bersifat pencegahan, perawatan kuratif bertujuan untuk mengembalikan kondisi struktural dan fungsional jalan. Salah satu bentuk umum dari perawatan ini adalah penggantian lapisan aspal pada area yang mengalami kerusakan parah seperti retak lelah (*fatigue cracking*), lubang besar (*potholes*), dan deformasi akibat rutting.

3) Rehabilitasi

Rehabilitasi perkerasan merupakan tindakan rekonstruksi skala besar yang dilakukan untuk memulihkan kondisi struktural dan fungsional jalan yang mengalami penurunan signifikan. Berbeda dari perawatan preventif dan kuratif yang bersifat lokal atau ringan, rehabilitasi mencakup pekerjaan perbaikan menyeluruh pada beberapa atau seluruh lapisan perkerasan. Tujuan utamanya adalah mengembalikan kapasitas daya dukung jalan agar dapat melayani lalu lintas dengan volume dan beban sesuai standar desain yang ditetapkan. Pendekatan rehabilitasi sering kali melibatkan pemodelan struktural ulang dan analisis kinerja historis jalan.

B. Strategi Pemeliharaan

Pemeliharaan jalan adalah suatu rangkaian kegiatan yang bertujuan menjaga kondisi dan fungsi jalan agar tetap optimal selama masa pakainya. Strategi pemeliharaan yang tepat dapat mencegah kerusakan jalan semakin parah, menghemat biaya perbaikan di masa depan, dan meningkatkan keselamatan serta kenyamanan pengguna jalan (Fani *et al.*, 2022). Secara umum, strategi pemeliharaan jalan dibagi menjadi tiga kategori utama, yaitu pemeliharaan rutin, pemeliharaan berkala, dan rehabilitasi jalan. Masing-masing memiliki karakteristik, tujuan, dan metode yang berbeda sesuai dengan kondisi jalan dan tingkat kerusakan.

1. Strategi Pemeliharaan Rutin

Pemeliharaan rutin adalah kegiatan yang dilakukan secara terus-menerus dan berkelanjutan untuk menjaga fungsi dan kondisi jalan agar tidak mengalami penurunan yang signifikan. Tujuan utamanya adalah mencegah kerusakan kecil berkembang menjadi kerusakan besar sehingga mengurangi kebutuhan rehabilitasi yang mahal (AASHTO, 2018). Beberapa kegiatan pemeliharaan rutin yang umum dilakukan antara lain:

- a. Pembersihan Saluran Drainase untuk Mencegah Genangan Air
Pembersihan saluran drainase merupakan salah satu strategi pemeliharaan rutin yang sangat penting dalam menjaga kinerja perkerasan jalan. Drainase yang berfungsi dengan baik akan mencegah akumulasi air di permukaan jalan, yang berpotensi meresap ke dalam lapisan bawah perkerasan dan melemahkan struktur jalan secara keseluruhan. Air yang tergenang dapat mempercepat proses pelapukan material, menyebabkan deformasi, retak, bahkan lubang pada permukaan jalan. Oleh karena itu, memastikan aliran air berjalan lancar melalui saluran drainase menjadi langkah preventif yang esensial dalam sistem pemeliharaan jalan.
- b. Penyegelan Retak Kecil (*Crack Sealing*) untuk Mencegah Masuknya Air Ke dalam Lapisan Perkerasan
Penyegelan retak kecil (*crack sealing*) merupakan salah satu strategi pemeliharaan rutin yang sangat efektif untuk menjaga integritas struktural perkerasan jalan. Retak-retak kecil yang

muncul di permukaan aspal, meskipun tampak sepele, dapat menjadi titik awal terjadinya kerusakan yang lebih serius apabila tidak segera ditangani. Penyegetan retak berfungsi sebagai penghalang terhadap masuknya air ke dalam lapisan perkerasan, yang jika dibiarkan dapat menyebabkan pelunakan lapisan bawah, pengelupasan, dan bahkan terbentuknya lubang (potholes).

c. Perbaikan Lubang Kecil dengan Metode Patching

Perbaikan lubang kecil pada perkerasan jalan merupakan bagian penting dari strategi pemeliharaan rutin, dan metode patching adalah teknik yang paling umum digunakan untuk tujuan ini. Lubang kecil yang muncul di permukaan jalan sering kali menjadi titik awal kerusakan yang lebih besar jika tidak segera diperbaiki. Patching, atau penambalan, dilakukan dengan cara membersihkan lubang terlebih dahulu dari material lepas, air, atau kotoran, kemudian mengisi lubang tersebut dengan campuran aspal baru atau bahan patching instan. Proses ini bertujuan untuk mengembalikan keseragaman permukaan jalan dan mencegah kerusakan lebih lanjut.

d. Pembersihan dan Pemeliharaan Marka Jalan, Rambu Lalu Lintas, dan Fasilitas Pendukung Jalan Lainnya

Pembersihan dan pemeliharaan marka jalan, rambu lalu lintas, serta fasilitas pendukung lainnya merupakan bagian penting dari strategi pemeliharaan rutin jalan. Marka jalan berfungsi sebagai panduan visual bagi pengemudi, terutama saat berkendara pada malam hari atau dalam kondisi cuaca buruk. Jika marka jalan sudah memudar, tertutup kotoran, atau rusak, risiko kecelakaan lalu lintas dapat meningkat secara signifikan. Oleh karena itu, pembersihan marka secara berkala, pengecatan ulang, serta penggantian marka thermoplastic atau cat berbahan reflektif harus dilakukan secara sistematis agar keselamatan pengguna jalan tetap terjaga.

Rambu lalu lintas juga berperan vital dalam pengaturan arus kendaraan dan pemberian informasi penting kepada pengemudi. Rambu yang tertutup debu, rusak, atau hilang dapat menyebabkan kebingungan di jalan dan meningkatkan potensi kecelakaan. Pemeriksaan berkala terhadap kondisi fisik rambu, termasuk tiang penyangga dan daya pantulnya, harus dilakukan

oleh petugas pemeliharaan. Bila ditemukan kerusakan, perbaikan atau penggantian sebaiknya segera dilaksanakan agar fungsi rambu tetap optimal.

2. Strategi Pemeliharaan Berkala

Pemeliharaan berkala dilakukan secara periodik sesuai interval waktu tertentu atau berdasarkan kondisi jalan yang terdeteksi melalui inspeksi. Tujuan utamanya adalah memperbaiki kerusakan yang sudah mulai nyata dan meningkatkan kondisi jalan sebelum kerusakan meluas (Fani *et al.*, 2022). Jenis kegiatan pemeliharaan berkala:

a. *Overlay* atau Penambahan Lapisan Aspal

Overlay atau penambahan lapisan aspal merupakan strategi pemeliharaan berkala yang bertujuan untuk memperpanjang umur layanan jalan dengan cara menambahkan lapisan baru di atas perkerasan lama. Proses ini dilakukan tanpa menghilangkan struktur yang sudah ada, asalkan kondisi struktural dasar masih cukup kuat. *Overlay* umumnya digunakan ketika permukaan jalan mulai menunjukkan tanda-tanda keausan seperti retak halus, deformasi ringan, atau kekasaran permukaan yang meningkat, namun belum mengalami kerusakan struktural yang parah.

b. Reprofilng dan Perbaikan Drainase

Reprofilng dan perbaikan drainase merupakan strategi pemeliharaan berkala yang sangat penting dalam menjaga kualitas dan umur layanan jalan. Reprofilng dilakukan untuk mengembalikan bentuk dan kemiringan melintang jalan agar air permukaan dapat mengalir dengan baik ke sisi jalan, bukan menggenang di tengah atau di sepanjang jalur kendaraan. Proses ini melibatkan pengikisan dan perataan ulang permukaan perkerasan yang mengalami deformasi atau aus akibat lalu lintas dan faktor cuaca. Kegiatan ini umumnya dikombinasikan dengan pelapisan ulang (*overlay*) atau tambal sulam jika diperlukan.

Sistem drainase juga harus diperbaiki agar air hujan tidak tertahan di permukaan atau merembes ke dalam lapisan perkerasan. Drainase yang buruk menjadi salah satu penyebab utama kerusakan jalan seperti retak, lubang, dan rutting karena air yang meresap melemahkan daya dukung tanah dasar serta

mempercepat penuaan aspal. Perbaikan drainase mencakup pembersihan saluran air, perbaikan gorong-gorong, dan peningkatan kapasitas saluran tepi jalan.

c. Patching Kerusakan Sedang

Patching kerusakan sedang merupakan salah satu strategi pemeliharaan berkala yang sangat penting untuk menjaga kondisi perkerasan jalan agar tidak mengalami kerusakan lebih parah. Kerusakan yang dimaksud biasanya berupa lubang atau retak yang sudah melebar dan dalam, sehingga berpotensi besar mengizinkan air masuk ke dalam lapisan perkerasan. Infiltrasi air ini dapat melemahkan struktur bawah jalan, mempercepat kerusakan seperti pengelupasan, penurunan daya dukung, bahkan keruntuhan lokal. Oleh karena itu, patching dilakukan sebagai tindakan preventif sekaligus kuratif untuk memperbaiki kerusakan tersebut sebelum meluas.

d. Penyegehan Permukaan (*Surface Treatment*)

Penyegehan permukaan atau *surface treatment* merupakan salah satu strategi pemeliharaan berkala yang efektif untuk meningkatkan kondisi permukaan jalan dan memperpanjang umur perkerasan aspal. Teknik ini melibatkan aplikasi lapisan tipis bahan pelindung seperti slurry seal, chip seal, atau fog seal yang berfungsi sebagai pelapis pelindung terhadap berbagai faktor eksternal, termasuk sinar matahari, air, dan beban lalu lintas. Dengan memberikan lapisan pelindung ini, proses oksidasi dan penuaan aspal dapat diperlambat, sehingga kualitas permukaan jalan tetap terjaga dalam jangka waktu lebih lama.

3. Strategi Rehabilitasi Jalan

Rehabilitasi adalah tindakan perbaikan besar yang dilakukan untuk mengembalikan fungsi dan kondisi jalan ke tingkat yang hampir sama dengan kondisi baru. Strategi ini dilakukan ketika pemeliharaan rutin dan berkala tidak lagi cukup untuk menjaga kualitas jalan. Jenis kegiatan rehabilitasi:

a. Rekonstruksi

Rekonstruksi merupakan salah satu strategi rehabilitasi jalan yang diterapkan ketika kerusakan pada perkerasan sudah sangat parah dan tidak dapat diperbaiki hanya dengan perawatan rutin atau pemeliharaan berkala. Proses ini melibatkan penggantian

seluruh lapisan perkerasan, mulai dari lapisan permukaan hingga lapisan pondasi, serta bagian-bagian struktur jalan yang mengalami kerusakan. Dengan melakukan rekonstruksi, kondisi jalan yang telah menurun kualitasnya dapat dikembalikan seperti semula, bahkan sering kali dengan peningkatan kualitas dan daya dukung agar lebih tahan terhadap beban lalu lintas di masa depan.

b. Perbaikan *Subgrade*

Perbaikan *Subgrade* merupakan bagian penting dari strategi rehabilitasi jalan, khususnya ketika tanah dasar mengalami kerusakan atau penurunan daya dukung akibat beban lalu lintas berat, kondisi drainase yang buruk, atau perubahan lingkungan. Tanah *Subgrade* yang tidak stabil dapat menyebabkan deformasi perkerasan di atasnya, seperti retak, alur, atau bahkan lubang, yang berdampak pada penurunan kualitas dan keselamatan jalan. Oleh karena itu, penguatan dan stabilisasi tanah dasar menjadi langkah krusial untuk memastikan struktur jalan dapat menahan beban dengan baik dan memiliki umur pakai yang lebih panjang.

c. *Overlay* Berat

Overlay berat merupakan salah satu strategi rehabilitasi jalan yang efektif untuk meningkatkan kapasitas dan daya tahan perkerasan terhadap beban lalu lintas yang tinggi. Metode ini dilakukan dengan menambahkan lapisan baru aspal atau beton yang cukup tebal di atas perkerasan lama yang sudah mengalami penurunan fungsi atau kerusakan signifikan. Tujuan utama *overlay* berat adalah untuk memperkuat struktur perkerasan sehingga mampu menahan beban kendaraan berat secara lebih optimal dan memperpanjang masa pakai jalan.

d. *Cold In-place Recycling* (CIR)

Cold In-place Recycling (CIR) adalah metode inovatif dalam rehabilitasi jalan yang menggunakan proses daur ulang lapisan aspal lama secara langsung di lokasi tanpa perlu pembongkaran penuh. Pada metode ini, lapisan aspal yang rusak dipecah dan dicampur dengan bahan tambahan seperti emulsified asphalt, bahan pengikat, dan kadang-kadang agregat baru untuk membentuk campuran baru yang memiliki kekuatan dan daya tahan yang baik. Proses ini dilakukan pada suhu rendah, sehingga lebih ramah lingkungan dan mengurangi emisi dibandingkan metode daur ulang panas.

4. Pendekatan Manajemen Pemeliharaan Jalan

a. Pendekatan Berbasis Kondisi (*Condition-Based Maintenance*)

Pendekatan Berbasis Kondisi (*Condition-Based Maintenance*) merupakan metode manajemen pemeliharaan jalan yang fokus pada penentuan tindakan pemeliharaan berdasarkan kondisi aktual dari permukaan dan struktur jalan. Pendekatan ini menggunakan data hasil inspeksi visual, pengujian lapangan, serta pengukuran parameter teknis seperti defleksi, kekasaran permukaan, dan kerusakan yang terjadi. Dengan informasi yang akurat dan terkini, pemeliharaan jalan dapat dilakukan secara tepat waktu, mencegah kerusakan yang lebih parah dan memperpanjang umur jalan (Titus-Glover *et al.*, 2019).

b. Sistem Manajemen Jalan (*Pavement Management System – PMS*)

Sistem Manajemen Jalan atau Pavement Management System (PMS) adalah sebuah alat bantu penting dalam pengelolaan infrastruktur jalan yang dirancang untuk mengumpulkan, mengelola, dan menganalisis data terkait kondisi jalan. PMS berfungsi untuk memantau kondisi perkerasan jalan melalui data inspeksi visual, hasil pengujian laboratorium, dan pengukuran teknis lainnya. Dengan data yang terintegrasi ini, PMS dapat memberikan gambaran yang komprehensif mengenai status jalan sehingga memudahkan pengambilan keputusan terkait pemeliharaan dan rehabilitasi.

c. Prioritas Pemeliharaan

Penentuan prioritas pemeliharaan jalan merupakan aspek penting dalam manajemen infrastruktur yang efisien dan berkelanjutan. Mengingat keterbatasan anggaran dan sumber daya, pemeliharaan tidak dapat dilakukan secara serentak pada seluruh ruas jalan. Oleh karena itu, pendekatan berbasis prioritas dibutuhkan untuk memastikan bahwa dana dan tenaga difokuskan pada ruas jalan yang paling membutuhkan perbaikan. AASHTO (2018) menekankan bahwa penetapan prioritas harus berdasarkan tiga indikator utama: tingkat kerusakan fisik, volume lalu lintas, dan fungsi strategis jalan tersebut dalam jaringan transportasi.

C. Teknologi *Overlay* dan Daur Ulang Perkerasan

Perkerasan jalan yang mengalami kerusakan seiring waktu memerlukan tindakan rehabilitasi agar dapat mengembalikan fungsi dan memperpanjang umur layanan jalan tersebut. Teknologi *overlay* dan daur ulang perkerasan merupakan dua metode utama yang sering digunakan dalam rehabilitasi jalan. *Overlay* adalah penambahan lapisan baru di atas perkerasan lama, sedangkan daur ulang melibatkan pemanfaatan kembali material lama untuk membentuk lapisan baru yang memiliki performa teknis baik (Mariyappan *et al.*, 2023). Penggunaan kedua teknologi ini secara tepat dapat meningkatkan efisiensi biaya, ramah lingkungan, dan berkontribusi pada pembangunan jalan berkelanjutan.

1. Teknologi *Overlay* Perkerasan

Overlay adalah proses penambahan lapisan perkerasan baru, baik berupa aspal panas (*hot mix asphalt*) maupun beton, di atas lapisan perkerasan lama yang masih cukup kuat secara struktural, tetapi permukaannya mengalami kerusakan atau aus. Tujuan utama *overlay* adalah memperbaiki kondisi permukaan jalan, meningkatkan ketahanan terhadap beban lalu lintas, serta memperpanjang umur perkerasan. Keuntungan *overlay* adalah proses yang relatif cepat, biaya yang lebih rendah dibandingkan rekonstruksi penuh, dan meningkatkan kenyamanan berkendara. Namun, *overlay* tidak efektif jika lapisan bawah mengalami kerusakan struktural berat, yang dapat menyebabkan kegagalan lapisan baru (Fani *et al.*, 2022).

a. Jenis-jenis *Overlay*:

1) *Overlay* Tipis (*Thin Overlay*)

Overlay tipis atau *thin overlay* merupakan salah satu jenis perawatan permukaan jalan yang dilakukan dengan menambahkan lapisan aspal baru setebal kurang dari 50 mm di atas perkerasan yang ada. Tujuan utama dari *overlay* ini adalah untuk memperbaiki ketidakrataan permukaan jalan, memperhalus tekstur, dan meningkatkan kenyamanan berkendara. *Overlay* tipis juga berfungsi sebagai pelindung terhadap infiltrasi air dan memperlambat laju kerusakan permukaan akibat keausan harian serta pengaruh cuaca. Meskipun lapisan yang ditambahkan relatif tipis, tindakan

ini cukup efektif dalam meningkatkan performa jangka pendek suatu ruas jalan.

2) *Overlay* Tebal (*Thick Overlay*)

Overlay tebal (*thick overlay*) adalah metode penambahan lapisan aspal baru dengan ketebalan lebih dari 50 mm di atas perkerasan lama. Jenis *overlay* ini tidak hanya berfungsi untuk memperbaiki permukaan jalan, tetapi juga memberikan penguatan struktural terhadap lapisan perkerasan yang ada. *Overlay* tebal sangat efektif dalam menangani kerusakan sedang hingga berat seperti deformasi, retak lelah, dan kekasaran tinggi.

3) *Overlay* Beton (*Rigid Overlay*)

Overlay beton (*rigid overlay*) merupakan jenis perkerasan tambahan yang menggunakan material beton semen portland, baik bertulang maupun tanpa tulangan, yang diaplikasikan di atas perkerasan eksisting. Jenis *overlay* ini dipilih terutama pada ruas jalan yang mengalami beban lalu lintas berat secara berulang, seperti jalan tol, kawasan industri, atau pelabuhan. *Overlay* beton memiliki keunggulan dalam ketahanan terhadap deformasi plastis dan keausan, serta memberikan umur layanan yang lebih panjang dibandingkan *overlay* fleksibel. Selain itu, struktur beton yang kaku mampu mendistribusikan beban secara lebih merata ke lapisan bawah.

b. Prosedur Pelaksanaan *Overlay*

1) Persiapan Permukaan

Persiapan permukaan merupakan tahap awal yang sangat penting dalam prosedur pelaksanaan *overlay*. Kualitas hasil akhir *overlay* sangat dipengaruhi oleh kondisi perkerasan eksisting sebelum dilakukan penambahan lapisan baru. Oleh karena itu, permukaan lama harus dibersihkan secara menyeluruh dari debu, kotoran, minyak, dan material lepas yang dapat mengganggu ikatan antara lapisan lama dan *overlay*. Pembersihan dapat dilakukan dengan penyapuan mekanis atau penyemprotan air bertekanan tinggi untuk memastikan tidak ada residu yang tersisa.

2) Penerapan *Seal Coat* atau *Tack Coat*

Penerapan *seal coat* atau *tack coat* merupakan langkah penting dalam prosedur pelaksanaan *overlay*, yang bertujuan untuk meningkatkan daya ikat antara lapisan perkerasan lama dan lapisan *overlay* baru. *Tack coat* biasanya berupa aspal emulsi yang disemprotkan secara merata di atas permukaan jalan eksisting sebelum dilakukan penghamparan lapisan baru. Adhesi yang baik antara kedua lapisan akan mencegah terjadinya delaminasi, yaitu pemisahan antara lapisan lama dan baru yang dapat menyebabkan kerusakan seperti gelombang atau retak prematur.

3) Penghamparan dan Pemadatan Material *Overlay*

Penghamparan dan pemadatan material *overlay* merupakan tahap inti dalam proses pelaksanaan *overlay* jalan, yang berperan penting dalam menjamin kekuatan dan daya tahan lapisan baru. Material *overlay* yang umumnya berupa campuran aspal panas (*hot mix asphalt*) dihamparkan secara merata menggunakan alat berat seperti asphalt paver. Ketebalan penghamparan disesuaikan dengan desain teknis yang telah direncanakan, baik untuk *overlay* tipis, tebal, maupun *overlay* beton. Proses ini harus dilakukan secara hati-hati untuk menghindari ketebalan yang tidak seragam yang dapat menyebabkan deformasi atau kerusakan struktural dini.

Tahap selanjutnya adalah pemadatan yang dilakukan menggunakan tandem roller, pneumatic roller, atau vibratory roller, tergantung pada jenis material dan kondisi lapangan. Tujuan utama dari pemadatan adalah untuk menghilangkan rongga udara dan meningkatkan kerapatan campuran, sehingga menghasilkan lapisan perkerasan yang kuat dan stabil. Pemadatan dilakukan secara bertahap dan berulang, dengan memperhatikan suhu material aspal agar tidak terlalu dingin sebelum dipadatkan, karena dapat mengurangi efektivitas pemadatan dan menyebabkan lapisan cepat rusak.

4) Pengerasan dan Pendinginan

Pengerasan dan pendinginan merupakan tahap akhir dalam proses pelaksanaan *overlay*, terutama pada *overlay* aspal. Setelah material aspal dihamparkan dan dipadatkan, lapisan

tersebut masih dalam kondisi panas dan lunak, sehingga belum dapat langsung dilalui oleh kendaraan. Proses pendinginan alami perlu dilakukan untuk menurunkan suhu lapisan aspal hingga mencapai suhu pengerasan yang stabil, biasanya di bawah 60°C. Pada suhu ini, material mulai menunjukkan kekuatan struktural yang cukup untuk menahan beban lalu lintas tanpa mengalami deformasi.

Proses pengerasan berlangsung secara bertahap, bergantung pada suhu lingkungan, ketebalan lapisan, dan intensitas sinar matahari. Pada beberapa proyek, terutama di daerah dengan suhu tinggi, dilakukan penyiraman air ringan secara hati-hati di sekitar area kerja untuk membantu mempercepat pendinginan. Namun, teknik ini harus dilakukan dengan perhitungan yang cermat agar tidak menyebabkan retak termal akibat perubahan suhu yang ekstrem. Selama masa pengerasan, akses kendaraan ke permukaan *overlay* yang baru selesai dipasang harus ditutup sementara guna mencegah kerusakan dini akibat beban sebelum waktu yang tepat.

2. Teknologi Daur Ulang Perkerasan

Daur ulang perkerasan adalah teknologi pemanfaatan kembali material aspal atau beton lama sebagai bahan dasar dalam membentuk lapisan perkerasan baru. Metode ini bertujuan mengurangi penggunaan bahan baku baru, menekan biaya konstruksi, dan mengurangi dampak lingkungan (Rout *et al.*, 2023). Keuntungan daur ulang:

- a. Ramah lingkungan karena mengurangi limbah dan kebutuhan bahan baku baru.
- b. Efisiensi biaya mencapai 20-40% dibandingkan metode konvensional.
- c. Proses lebih cepat dengan gangguan lalu lintas minimal.
- d. Memperbaiki kondisi lapisan bawah yang rusak secara struktural.

1) Jenis-jenis Daur Ulang

a) *Cold In-Place Recycling* (CIR)

Cold In-Place Recycling (CIR) adalah metode daur ulang perkerasan jalan yang dilakukan langsung di lokasi tanpa proses pemanasan. Dalam metode ini, lapisan aspal lama

digiling dengan mesin khusus hingga kedalaman tertentu, kemudian material hasil gilingan tersebut langsung dicampur dengan bahan tambahan seperti emulsified asphalt, semen, atau bahan pengikat lainnya. Proses pencampuran dilakukan secara homogen di tempat (in-situ), lalu campuran tersebut dihampar dan dipadatkan kembali untuk membentuk lapisan perkerasan baru. Teknik ini memungkinkan pemanfaatan kembali material eksisting sehingga mengurangi kebutuhan bahan baru dan biaya transportasi.

b) *Hot In-Place Recycling* (HIR)

Hot In-Place Recycling (HIR) adalah metode daur ulang perkerasan jalan yang dilakukan dengan memanaskan lapisan aspal lama langsung di lokasi. Proses ini melibatkan pemanasan permukaan jalan menggunakan alat khusus hingga material aspal lunak kembali, kemudian lapisan tersebut digiling dan dicampur dengan bahan tambahan seperti aspal baru, agregat, atau bahan pengikat lainnya. Setelah pencampuran, campuran tersebut segera dihamparkan kembali dan dipadatkan untuk membentuk lapisan perkerasan yang baru. Teknik ini memungkinkan perbaikan struktur jalan tanpa perlu membongkar seluruh lapisan, sehingga menghemat waktu dan biaya konstruksi.

c) *Full-Depth Reclamation* (FDR)

Full-Depth Reclamation (FDR) adalah metode daur ulang perkerasan jalan yang melibatkan penggilingan seluruh lapisan perkerasan beserta sebagian tanah dasar hingga kedalaman tertentu. Material hasil penggilingan tersebut kemudian dicampur secara merata, sering kali dengan penambahan bahan stabilizer seperti semen, kapur, atau bahan pengikat lainnya, untuk meningkatkan kekuatan dan kestabilan campuran. Setelah pencampuran, material tersebut dipadatkan kembali untuk membentuk dasar jalan yang kuat dan homogen. Teknik ini memungkinkan pemulihan struktur jalan secara menyeluruh tanpa perlu membongkar dan mengganti lapisan secara terpisah.

2) Proses Pelaksanaan Daur Ulang

a) Penggilingan (*Milling*)

Proses pelaksanaan daur ulang jalan dimulai dengan tahap penggilingan atau milling, yaitu pengambilan material lama dari permukaan perkerasan yang sudah rusak menggunakan mesin milling khusus. Mesin ini berfungsi untuk menggiling lapisan aspal atau beton lama hingga kedalaman dan ukuran tertentu sesuai dengan kebutuhan perbaikan. Penggilingan ini bertujuan untuk menghilangkan bagian perkerasan yang sudah aus, retak, atau tidak mampu mendukung beban lalu lintas, sekaligus menyiapkan material yang akan diolah kembali pada tahap selanjutnya.

b) Pencampuran

Setelah proses penggilingan selesai, tahap berikutnya dalam pelaksanaan daur ulang adalah pencampuran material giling dengan bahan tambahan tertentu. Material yang telah tergiling tersebut dicampur secara merata dengan bahan pengikat seperti emulsified asphalt, kapur (lime), atau semen. Tujuan pencampuran ini adalah untuk meningkatkan sifat mekanik dan daya tahan lapisan perkerasan yang akan dibentuk kembali. Bahan tambahan dipilih berdasarkan kondisi jalan dan jenis kerusakan yang ingin diperbaiki agar hasil daur ulang memiliki kekuatan dan stabilitas yang optimal.

c) Penghamparan dan Pemadatan

Setelah campuran material hasil pencampuran dengan bahan tambahan selesai dibuat, tahap berikutnya dalam proses pelaksanaan daur ulang adalah penghamparan campuran tersebut di lokasi proyek. Proses penghamparan dilakukan dengan menggunakan alat berat seperti paving machine atau spreader yang mampu menyebarkan campuran secara merata pada permukaan jalan yang akan diperbaiki. Penyebaran campuran harus dilakukan dengan hati-hati dan teliti agar ketebalan lapisan sesuai dengan perencanaan dan tidak terjadi ketidakrataan permukaan yang dapat mengganggu

kenyamanan berkendara serta mengurangi umur perkerasan.

Setelah penghamparan, tahap selanjutnya adalah pemadatan campuran. Pemadatan merupakan proses penting untuk memastikan campuran menjadi padat, kompak, dan memiliki kepadatan yang cukup agar mampu menahan beban lalu lintas. Alat berat seperti roller (pembangun jalan) digunakan untuk memadatkan lapisan yang baru dihamparkan. Pemadatan dilakukan secara bertahap dan sistematis dengan mengulang beberapa kali agar mencapai densitas yang diinginkan dan menghilangkan rongga udara di dalam campuran. Hasil pemadatan yang baik akan meningkatkan kekuatan struktural serta ketahanan lapisan perkerasan terhadap deformasi dan kerusakan dini.

d) Finishing

Setelah proses penghamparan dan pemadatan campuran daur ulang selesai, tahap finishing menjadi langkah penting untuk menyelesaikan pekerjaan perbaikan jalan. Finishing biasanya dilakukan dengan penerapan *overlay* tipis atau *seal coat* pada permukaan lapisan yang telah diperbaiki. *Overlay* tipis berfungsi untuk memperbaiki tekstur permukaan, meratakan ketidaksempurnaan, dan memberikan lapisan pelindung tambahan agar lapisan daur ulang lebih tahan terhadap keausan dan kerusakan akibat lalu lintas dan cuaca.

Seal coat, yang merupakan lapisan tipis aspal cair atau emulsified asphalt yang dihamparkan pada permukaan jalan, bertujuan untuk mengurangi penetrasi air ke dalam lapisan bawah, meningkatkan daya tahan terhadap oksidasi, serta memperpanjang umur perkerasan. Proses ini juga membantu mengurangi efek retak mikro yang mungkin muncul setelah daur ulang dan memberikan tampilan permukaan yang lebih halus dan aman untuk pengguna jalan. Dengan adanya lapisan finishing ini, kualitas permukaan jalan menjadi lebih baik dan risiko kerusakan lebih lanjut dapat diminimalkan. Selain fungsi teknis, tahap finishing juga berperan penting dalam

meningkatkan kenyamanan pengendara. Permukaan yang halus dan rata akan mengurangi getaran dan meningkatkan keselamatan berkendara.

3) Studi Kasus dan Implementasi

Penerapan teknologi *Cold In-Place Recycling* (CIR) di wilayah DKI Jakarta merupakan salah satu inovasi penting dalam strategi pemeliharaan jalan perkotaan. Kota metropolitan dengan lalu lintas padat ini menghadapi tantangan besar dalam pelaksanaan pekerjaan jalan, terutama terkait durasi penutupan ruas yang dapat menimbulkan kemacetan parah. Oleh karena itu, metode CIR dipilih sebagai solusi karena memungkinkan proses daur ulang material perkerasan lama dilakukan langsung di lokasi tanpa memerlukan pemanasan dan transportasi material baru secara masif. Teknologi ini sangat cocok untuk kondisi jalan kota yang mengalami kerusakan sedang dan terdistribusi secara merata.

Implementasi CIR di beberapa ruas jalan kota Jakarta menunjukkan efisiensi yang signifikan. Waktu penutupan jalan selama proses pemeliharaan dapat dikurangi hingga 50% dibandingkan metode konvensional seperti penggantian lapisan atau *overlay* penuh. Hal ini memberikan dampak positif terhadap kelancaran arus lalu lintas dan aktivitas masyarakat sekitar. Selain itu, biaya pemeliharaan dapat ditekan sekitar 30% karena tidak diperlukan pengadaan material baru dalam jumlah besar. Campuran daur ulang yang digunakan, terdiri atas aspal emulsi dan agregat lama, tetap mampu memberikan kekuatan struktural yang memadai untuk mendukung beban lalu lintas harian.

4) Studi Kasus *Full Depth Reclamation* (FDR) di Amerika Serikat

Studi kasus penerapan *Full Depth Reclamation* (FDR) di Amerika Serikat menunjukkan bagaimana teknologi daur ulang total perkerasan dapat menjadi solusi efektif untuk menangani kerusakan jalan yang parah. FDR merupakan metode yang melibatkan penggilingan seluruh lapisan perkerasan hingga ke tanah dasar, kemudian mencampurnya dengan bahan stabilisasi seperti semen atau emulsi aspal.

Proses ini memungkinkan perbaikan menyeluruh terhadap kekuatan struktural jalan dengan biaya dan waktu yang lebih efisien dibandingkan metode rekonstruksi konvensional. Di negara bagian seperti Texas dan California, FDR banyak digunakan untuk jalan negara bagian yang mengalami keausan berat dan deformasi lapisan bawah.

Salah satu keunggulan FDR adalah kemampuannya untuk memperkuat kembali struktur perkerasan dan tanah dasar secara simultan. Dengan mengolah kembali material eksisting di lokasi, kebutuhan akan pengangkutan material baru dapat ditekan secara signifikan. Hasilnya, tidak hanya struktur jalan menjadi lebih kuat dan tahan lama, tetapi juga waktu konstruksi dapat dikurangi secara drastis. Dalam beberapa proyek, waktu pelaksanaan turun hingga 40% dibandingkan metode rekonstruksi penuh, yang berdampak langsung pada pengurangan gangguan terhadap lalu lintas dan aktivitas masyarakat di sekitar proyek.

5) Integrasi Teknologi *Overlay* dan Daur Ulang dalam Manajemen Pemeliharaan Jalan

Integrasi antara teknologi *overlay* dan daur ulang dalam manajemen pemeliharaan jalan merupakan pendekatan strategis yang semakin banyak diterapkan dalam rehabilitasi infrastruktur jalan. Kedua metode memiliki fungsi yang saling melengkapi. Teknologi daur ulang, seperti *Cold In-Place Recycling* (CIR) atau *Full-Depth Reclamation* (FDR), digunakan untuk menangani kerusakan struktural pada lapisan bawah dan tanah dasar. Sementara itu, teknologi *overlay*, baik *overlay* tipis maupun tebal lebih difokuskan pada perbaikan permukaan jalan, penghalusan tekstur, dan peningkatan kenyamanan berkendara. Kombinasi ini memungkinkan peningkatan kinerja perkerasan secara menyeluruh, dari bawah hingga ke lapisan atas.

Efektivitas integrasi kedua metode ini sangat bergantung pada pemanfaatan data kondisi jalan yang akurat melalui sistem manajemen jalan atau *Pavement Management System* (PMS). Sistem ini mengandalkan hasil inspeksi visual, pengujian struktural, dan pemodelan prediktif untuk menentukan area mana yang memerlukan daur ulang

menyeluruh dan mana yang cukup dengan *overlay*. Dengan data tersebut, pemeliharaan tidak dilakukan secara seragam, melainkan berbasis kondisi aktual, sehingga alokasi sumber daya menjadi lebih efisien dan tepat sasaran.

D. Sistem Manajemen Pemeliharaan Jalan

Sistem Manajemen Pemeliharaan Jalan adalah sebuah kerangka kerja yang menggunakan data dan informasi terkait kondisi jalan, lalu lintas, dan lingkungan untuk menentukan prioritas dan alokasi sumber daya pemeliharaan secara optimal (FHWA, 2018). Sistem ini mengintegrasikan aspek teknis, ekonomi, dan administratif dalam pengambilan keputusan.

1. Pengumpulan Data

Pengumpulan data kondisi jalan merupakan langkah awal yang sangat krusial dalam proses manajemen pemeliharaan infrastruktur jalan. Data ini menjadi dasar bagi pengambilan keputusan terkait jenis pemeliharaan yang dibutuhkan, lokasi prioritas, serta estimasi biaya dan waktu pelaksanaan. Secara umum, pengumpulan data dilakukan secara berkala untuk memantau perkembangan kondisi perkerasan dari waktu ke waktu. Informasi yang dikumpulkan mencakup jenis dan tingkat kerusakan, deformasi permukaan, serta kualitas struktural dari lapisan jalan (Gkyrtis *et al.*, 2021).

Metode pengumpulan data konvensional biasanya dilakukan melalui survei visual yang dilaksanakan oleh tim teknis di lapangan. Selain itu, pengukuran mekanis menggunakan alat seperti profilometer digunakan untuk mengukur kerataan jalan, sedangkan deflectometer digunakan untuk menilai daya dukung struktural perkerasan. Meskipun efektif, metode ini cenderung memakan waktu dan biaya operasional yang tinggi, terutama untuk jaringan jalan yang luas dan tersebar. Oleh karena itu, dibutuhkan metode yang lebih efisien dan adaptif terhadap tantangan geografis serta kondisi lapangan.

Gambar 2. Penggunaan Drone



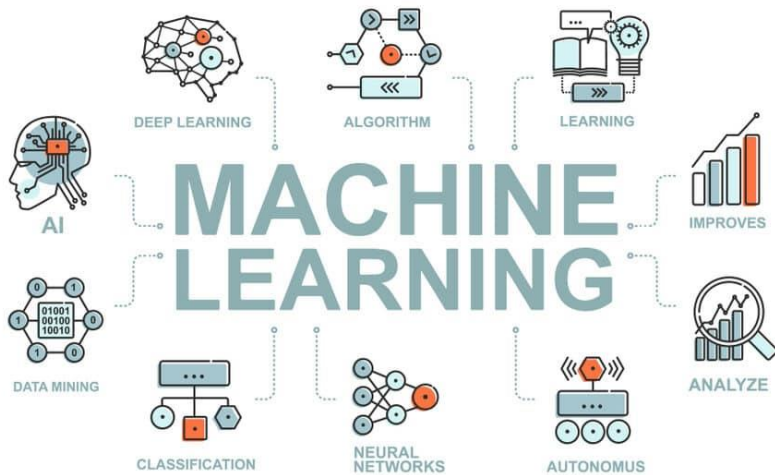
Sumber: *Doran*

2. Analisis Kondisi dan Prediksi

Analisis kondisi dan prediksi merupakan tahap lanjutan yang sangat penting setelah data kondisi jalan dikumpulkan. Tahap ini bertujuan untuk memahami karakteristik kerusakan yang terjadi pada jalan, baik dari jenis, tingkat keparahan, maupun persebarannya. Proses analisis melibatkan identifikasi pola retakan, deformasi, dan keausan lapisan permukaan, yang kemudian dibandingkan dengan standar kinerja jalan yang telah ditetapkan. Dengan analisis yang tepat, pemangku kepentingan dapat menentukan intervensi yang paling sesuai, seperti pemeliharaan rutin, berkala, atau rehabilitasi total (Kim *et al.*, 2019).

Untuk memperkuat keputusan teknis dan perencanaan jangka panjang, data yang telah dianalisis juga dimasukkan ke dalam model prediktif. Model ini dirancang untuk memperkirakan perkembangan kerusakan pada masa mendatang berdasarkan parameter teknis dan lingkungan, seperti beban lalu lintas, curah hujan, serta kualitas material perkerasan. Penggunaan model prediksi dapat memberikan estimasi waktu kegagalan perkerasan dan menyarankan waktu optimal untuk pemeliharaan, sehingga biaya siklus hidup jalan dapat diminimalkan.

Gambar 3. *Machine Learning*



Sumber: *Codepolitan*

Berbagai pendekatan digunakan dalam pengembangan model prediksi, mulai dari metode statistik regresi hingga kecerdasan buatan seperti machine learning. Model ini memungkinkan perencanaan yang lebih proaktif dibandingkan pendekatan reaktif, dengan memfasilitasi pengambilan keputusan berbasis data.

3. Prioritisasi Kegiatan Pemeliharaan

Prioritisasi kegiatan pemeliharaan jalan merupakan tahapan penting dalam manajemen aset infrastruktur, khususnya ketika sumber daya yang tersedia terbatas. Dengan pendekatan berbasis analisis risiko, biaya, dan manfaat, manajer jalan dapat mengalokasikan dana dan tenaga secara efisien untuk kegiatan yang paling mendesak dan berdampak besar. Strategi ini membantu mencegah terjadinya kerusakan lebih parah pada ruas-ruas jalan yang memiliki peran strategis dan volume lalu lintas tinggi. Oleh karena itu, perencanaan pemeliharaan tidak dilakukan secara acak, melainkan mengikuti skema yang sistematis dan berbasis data.

Faktor utama dalam menentukan prioritas adalah tingkat kerusakan jalan, nilai fungsi jalan (primer, sekunder, tersier), dan volume kendaraan yang melintas setiap hari. Jalan yang melayani lalu lintas berat atau menghubungkan kawasan industri dan pusat logistik biasanya mendapat perhatian lebih tinggi. Selain itu, analisis risiko mempertimbangkan potensi kerugian ekonomi jika ruas jalan tertentu gagal berfungsi, seperti keterlambatan distribusi barang atau kecelakaan

lalu lintas. Biaya penanganan juga diperhitungkan—jika perbaikan dini lebih murah dibanding perbaikan besar akibat penundaan, maka kegiatan tersebut akan masuk prioritas tinggi.

4. Penyusunan Rencana dan Anggaran

Penyusunan rencana dan anggaran merupakan tahap akhir yang sangat krusial dalam proses manajemen pemeliharaan jalan. Proses ini melibatkan perencanaan teknis dan keuangan yang terintegrasi agar kegiatan pemeliharaan berjalan sesuai dengan target dan kapasitas fiskal. Menurut FHWA (2018), penyusunan rencana pemeliharaan harus mencakup jadwal pelaksanaan, volume pekerjaan, jenis perbaikan yang diperlukan, dan estimasi biaya secara rinci. Penjadwalan yang baik tidak hanya menghindari gangguan lalu lintas yang tidak perlu, tetapi juga memastikan koordinasi antarinstansi dan kontraktor yang terlibat berjalan lancar.

Untuk merancang anggaran, pemerintah atau pengelola jalan harus memperhatikan kebutuhan pemeliharaan yang bersifat kritis terlebih dahulu, terutama untuk ruas jalan dengan kerusakan berat atau yang berfungsi sebagai jalur utama transportasi. Anggaran juga harus mempertimbangkan ketersediaan dana dari berbagai sumber seperti APBN, APBD, dana hibah, atau kerja sama dengan sektor swasta. Penggunaan data historis biaya dan standar biaya satuan pekerjaan menjadi dasar dalam membuat estimasi yang realistis dan akurat. Dengan demikian, setiap pengeluaran dapat dipertanggungjawabkan dan tidak melebihi kapasitas fiskal.

5. Pelaksanaan dan Evaluasi

Pelaksanaan pemeliharaan jalan merupakan tahap operasional yang menuntut ketelitian dan disiplin tinggi agar sesuai dengan rencana teknis yang telah disusun sebelumnya. Kegiatan ini melibatkan tenaga kerja, alat berat, serta penggunaan bahan sesuai spesifikasi. Pengawasan ketat perlu diterapkan pada setiap tahapan pekerjaan untuk memastikan bahwa kualitas pelaksanaan memenuhi standar yang telah ditentukan. Selain itu, koordinasi antara instansi teknis, kontraktor pelaksana, dan pihak pengawas menjadi kunci utama agar pekerjaan dapat diselesaikan tepat waktu, dalam batas anggaran, dan tanpa mengganggu arus lalu lintas secara signifikan.

Setelah pekerjaan pemeliharaan selesai dilakukan, tahapan evaluasi menjadi komponen penting untuk mengukur efektivitas dan efisiensi dari program yang telah dijalankan. Evaluasi dilakukan melalui survei pasca-pemeliharaan dan analisis teknis terhadap hasil pekerjaan, seperti kelancaran permukaan jalan, kemampuan drainase, dan tingkat kepuasan pengguna jalan. Evaluasi juga melibatkan perbandingan antara hasil aktual dan target perencanaan awal, sehingga dapat diketahui apakah sasaran teknis, waktu, dan anggaran telah tercapai. Evaluasi ini berfungsi untuk menilai keberhasilan program sekaligus mengidentifikasi kelemahan dalam pelaksanaan.

6. Contoh Implementasi Sistem Manajemen Pemeliharaan Jalan

a. Indonesia

Implementasi sistem manajemen pemeliharaan jalan di Indonesia terus berkembang seiring kebutuhan akan efisiensi dan transparansi dalam pengelolaan infrastruktur. Salah satu contoh yang menonjol adalah penerapan *Road Maintenance Management System* (RMMS) berbasis GIS dan aplikasi mobile di DKI Jakarta dan Jawa Barat. Sistem ini memungkinkan pengumpulan data kondisi jalan secara real-time melalui perangkat mobile yang terintegrasi dengan peta digital. Dengan pendekatan ini, instansi terkait dapat segera mengidentifikasi lokasi kerusakan, mengevaluasi jenis penanganan yang dibutuhkan, serta merencanakan tindakan perbaikan dengan lebih cepat dan akurat.

Di DKI Jakarta, penggunaan RMMS telah diintegrasikan dengan sistem pelaporan masyarakat melalui aplikasi berbasis Android. Masyarakat dapat melaporkan kerusakan jalan secara langsung, yang kemudian diverifikasi oleh petugas lapangan. Sistem ini mendukung pendekatan berbasis kondisi (*condition-based maintenance*), sehingga penanganan dapat dilakukan tepat sasaran tanpa harus menunggu inspeksi rutin. Selain itu, RMMS juga dilengkapi dengan fungsi analitik yang dapat memperkirakan kebutuhan anggaran pemeliharaan dan menyusun skala prioritas berdasarkan volume lalu lintas serta tingkat kerusakan.

b. Amerika Serikat

Implementasi *Pavement Management System* (PMS) oleh *Federal Highway Administration* (FHWA) di Amerika Serikat merupakan salah satu contoh paling komprehensif dalam pengelolaan pemeliharaan jalan secara nasional. Sistem ini tidak hanya mengandalkan data kondisi permukaan jalan, tetapi juga mengintegrasikan berbagai variabel seperti data lalu lintas, beban kendaraan, kondisi iklim, serta proyeksi pertumbuhan wilayah. Dengan pendekatan berbasis data ini, FHWA mampu merencanakan dan mengoptimalkan kegiatan pemeliharaan serta rehabilitasi jalan secara lebih sistematis dan berbasis bukti (*evidence-based*).

c. India

Implementasi sistem manajemen pemeliharaan jalan di India telah mengalami kemajuan pesat dengan adopsi teknologi *Internet of Things* (IoT) dan *machine learning* dalam beberapa tahun terakhir. Kota-kota besar seperti Delhi, Mumbai, dan Bengaluru telah mulai menerapkan sistem pintar berbasis sensor IoT untuk memantau kondisi jalan secara real-time. Sensor-sensor ini dipasang pada kendaraan atau di bagian bawah struktur jalan dan mampu mengukur getaran, suhu, serta tekanan lalu lintas yang menjadi indikator awal potensi kerusakan. Data yang diperoleh dikirimkan secara langsung ke pusat kontrol, memungkinkan pengambilan keputusan lebih cepat dan akurat. Teknologi *machine learning* dimanfaatkan untuk memproses data dalam jumlah besar dan mengidentifikasi pola-pola kerusakan yang tidak mudah terdeteksi secara manual. Model prediktif berbasis AI ini mampu memperkirakan lokasi dan waktu terjadinya kerusakan di masa mendatang, sehingga kegiatan pemeliharaan dapat direncanakan secara proaktif. Hasilnya, pemerintah kota dapat menghindari kerusakan parah yang memerlukan biaya besar untuk perbaikan dan menurunkan tingkat gangguan terhadap arus lalu lintas.

The background image shows a construction site with three workers in orange safety vests and blue jeans. They are standing near a large blue roller machine that is spreading material on a road. The scene is outdoors with some greenery in the background.

BAB XI

KESIMPULAN

Buku referensi "Konstruksi Perkerasan Jalan: Standar, Material, dan Teknik Lapangan" membahas secara komprehensif tentang berbagai aspek penting dalam perencanaan, pembangunan, dan pemeliharaan jalan. Pembahasan dimulai dari konsep dasar perkerasan jalan, termasuk fungsi struktur perkerasan, jenis perkerasan lentur dan kaku, serta prinsip-prinsip desain yang memperhatikan beban lalu lintas dan umur rencana. Penjelasan awal ini menjadi dasar penting untuk memahami keseluruhan siklus hidup infrastruktur jalan. Selanjutnya, buku ini membahas secara mendalam karakteristik material konstruksi jalan, seperti agregat, aspal, dan bahan stabilisasi. Penjelasan tidak hanya mencakup jenis dan sifat material, tetapi juga metode pengujian laboratorium dan kriteria standar mutu yang harus dipenuhi. Pemilihan material yang tepat sangat menentukan kekuatan dan ketahanan perkerasan terhadap kerusakan akibat beban dinamis dan faktor lingkungan.

Teknik pelaksanaan lapangan juga menjadi fokus penting. Buku ini menyajikan berbagai metode pengujian lapangan seperti uji kepadatan tanah, ketebalan lapisan, dan pengendalian mutu pekerjaan. Pengawasan ketat terhadap pelaksanaan konstruksi sangat diperlukan agar hasil di lapangan sesuai dengan spesifikasi desain. Aspek ini menunjukkan pentingnya sinergi antara perencanaan teknis dan implementasi aktual di lapangan. Sistem drainase menjadi bagian integral dalam perkerasan jalan yang tidak boleh diabaikan. Buku ini membahas bagaimana perencanaan dan pembangunan sistem drainase yang efektif dapat memperpanjang umur jalan dengan mencegah kerusakan akibat infiltrasi air. Evaluasi kondisi jalan seperti uji defleksi, Marshall, dan kekasaran permukaan turut dijelaskan sebagai bagian dari pemantauan berkelanjutan terhadap kualitas jalan.

Buku referensi ini membahas strategi pemeliharaan dan rehabilitasi jalan, termasuk penggunaan teknologi *overlay* dan daur ulang perkerasan. Pendekatan ini tidak hanya efisien dari segi biaya, tetapi juga mendukung keberlanjutan dengan mengurangi kebutuhan material baru. Sistem manajemen pemeliharaan berbasis data dan teknologi digital seperti GIS dan IoT juga dipaparkan sebagai inovasi dalam pengelolaan infrastruktur jalan modern. Secara keseluruhan, buku ini memberikan panduan teknis yang lengkap dan aplikatif bagi para praktisi, akademisi, maupun pengambil kebijakan di bidang infrastruktur jalan. Dengan pendekatan teoritis dan praktis yang seimbang, buku ini mendukung peningkatan kualitas perkerasan jalan di Indonesia secara berkelanjutan. Kolaborasi antar pihak dan perhatian terhadap aspek sosial-lingkungan juga ditekankan sebagai bagian dari upaya menciptakan jalan yang aman, nyaman, dan tahan lama.



DAFTAR PUSTAKA

- AASHTO. (2011). *Standard Specifications for Transportation Materials and Methods of Sampling and Testing*. American Association of State Highway and Transportation Officials. Retrieved from <https://books.google.co.id/books?id=af0SE6u7UGUC>
- Absyah, M. R., & Hartatik, N. (2023). ANALISIS PERBANDINGAN PENGGUNAAN ASPAL PEN 60/70 MODIF PG 70 DENGAN ASPAL CURAH PADA CAMPURAN AC-WC. *Jurnal Ilmiah Teknik Dan Manajemen Industri*, 3(2), 1275–1289.
- Ahmad, S. N., Isdyanto, A., Rachman, R. M., Wahyuni, I. P. I., Rustan, F. R., & Rachim, F. (2024). *Perencanaan dan Manajemen Proyek Pembangunan Jalan Tol*. TOHAR MEDIA. Retrieved from <https://books.google.co.id/books?id=b30NEQAAQBAJ>
- Al-Amri, F. (2013). Studi Perbandingan Penggunaan Aspal Minyak Dengan Aspal Buton Lawele Pada Campuran Aspal Concrete Base Course (Ac-Bc) Menggunakan Metode Marshall Test. *Radial*, 4(2), 181–190.
- Al-Swaidani, A., Hammoud, I., & Meziab, A. (2016). Effect of adding natural pozzolana on geotechnical properties of lime-stabilized clayey soil. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 8(5), 714–725.
- Arvis, J.-F., Ojala, L., Shepherd, B., Ulybina, D., & Wiederer, C. (2023). Connecting to compete 2023: Trade logistics in an uncertain global economy-the logistics performance index and its indicators.
- Azis, M. I. W., & Hamsyah, H. (2022). Uji Experimental Variasi Agregat Halus Pada Campuran Asphalt AC-BC. *Jurnal Karajata Engineering*, 2(1), 64–72.
- Badan Standardisasi Nasional. (2012). SNI 1744:2012 Metode Uji CBR Laboratorium.
- Badan Standardisasi Nasional. (2019). SNI 2847:2019 Persyaratan Beton Struktural untuk Bangunan Gedung, (8).
- Bethary, R. T., & Intari, D. E. (2022). Penggunaan Limbah Slag Nikel Untuk Material Jalan Ramah Lingkungan. *Fondasi: Jurnal Teknik Sipil*, 11(1), 34–43.
- Budhu, M. (2015). *Soil Mechanics Fundamentals*. Wiley. Retrieved

- from <https://books.google.co.id/books?id=5emrCAAAQBAJ>
- Chu, X., Campos-Guereta, I., Dawson, A., & Thom, N. (2023). Sustainable pavement drainage systems: *Subgrade* moisture, subsurface drainage methods and drainage effectiveness. *Construction and Building Materials*, 364, 129950.
- Chu, X., Thom, N., Dawson, A., Qin, L., & Chen, H. (2023). Drainage effects on shear behaviour and stiffness of *Subgrade* soils and pavement drainage implications. *Construction and Building Materials*, 389, 131697.
- Civera, M., Naseem, A., & Chiaia, B. (2024). Recent advances in embedded technologies and self-sensing concrete for structural health monitoring. *Structural Concrete*.
- Correia, M. G., & Ferreira, A. (2023). Road asset management and the vehicles of the future: an overview, opportunities, and challenges. *International Journal of Intelligent Transportation Systems Research*, 21(3), 376–393.
- Dalhat, M. A., & Al-Abdul Wahhab, H. I. (2017). Performance of recycled plastic waste modified asphalt binder in Saudi Arabia. *International Journal of Pavement Engineering*, 18(4), 349–357.
- Das, B. M., & Sivakugan, N. (2017). *Fundamentals of geotechnical engineering*. Cengage Learning.
- Das, R., Mohammad, L. N., Elseifi, M., Cao, W., & Cooper Jr, S. B. (2017). Effects of tack coat application on interface bond strength and short-term pavement performance. *Transportation Research Record*, 2633(1), 1–8.
- Datu, I. T., & Khairil, K. (2019). Evaluasi Pemanfaatan Limbah Slag Baja Sebagai Agregat Halus Pada Produksi Beton Mutu Tinggi. In *Seminar Nasional Hasil Penelitian & Pengabdian Kepada Masyarakat (SNP2M)* (Vol. 4, pp. 119–123).
- Delatte, N. J. (2017). *Concrete Pavement Design, Construction, and Performance*. Taylor & Francis Group. Retrieved from <https://books.google.co.id/books?id=z-f5twEACAAJ>
- Direktorat Jenderal Bina Marga. (1997). Manual Kapasitas Jalan Indonesia (MKJI).
- Direktorat Jenderal Bina Marga. (2020). Spesifikasi Umum 2018, (Revisi 2).
- Direktorat Jenderal Bina Marga. (2024). Manual Desain Perkerasan

Jalan (MDPJ).

- Do, T. C., Tran, V. P., Lee, H. J., & Kim, W. J. (2019). Mechanical characteristics of tensile strength ratio method compared to other parameters used for moisture susceptibility evaluation of asphalt mixtures. *Journal of Traffic and Transportation Engineering (English Edition)*, 6(6), 621–630.
- du Tertre, A., Kırılancı, A. S., Cascante, G., & Tighe, S. L. (2022). Ultrasonic inspection of asphalt pavements to assess longitudinal joints. *Road Materials and Pavement Design*, 23(1), 129–148.
- Dwina, D. O., Nazarudin, N., Kumalasari, D., & Fitriani, E. (2021). Stabilisasi Tanah Gambut Dengan Penambahan Kapur dan Fly Ash Sisa Pembakaran Cangkang Sawit Sebagai *Subgrade* Jalan. *Fondasi: Jurnal Teknik Sipil*, 10(1), 24–32.
- Dzhabrailov, K., Gorodnichev, M., Gematudinov, R., & Chantieva, M. (2019). Development of a Control System for the Transportation of Asphalt Mix with the Maintenance of the Required Temperature. In *International Scientific Siberian Transport Forum* (pp. 354–364). Springer.
- Endah, F. Y. (2024). Evaluasi Perencanaan Pondasi Cerucuk Bambu Pada Gedung Kampus I Universitas Muhammadiyah Sumatera Barat. Universitas Muhammadiyah Sumatera Barat.
- Fani, A., Golroo, A., Ali Mirhassani, S., & Gandomi, A. H. (2022). Pavement maintenance and rehabilitation planning optimisation under budget and pavement deterioration uncertainty. *International Journal of Pavement Engineering*, 23(2), 414–424.
- Francois, A., Ali, A., & Mehta, Y. (2019). Evaluating the impact of different types of stabilised bases on the overall performance of flexible pavements. *International Journal of Pavement Engineering*, 20(8), 938–946.
- Geremew, A., De Winne, P., Demissie, T. A., & De Backer, H. (2021). Treatment of natural fiber for application in concrete pavement. *Advances in Civil Engineering*, 2021(1), 6667965.
- Gkyrtis, K., Loizos, A., & Plati, C. (2021). Integrating pavement sensing data for pavement condition evaluation. *Sensors*, 21(9), 3104.
- Gunawan, W. N., Manoppo, F., & Sarajar, A. N. (2018). Analisis Stabilitas Tanah rawa Terhadap Embankment Jalan Tol Manado Bitung dengan Menggunakan semen yang Dipadukan dengan Abu Terbang (Fly Ash). *Jurnal Sipil Statik*, 6(3), 189–198.

- Gupta, R. S. (2016). *Hydrology and Hydraulic Systems: Fourth Edition*. Waveland Press. Retrieved from <https://books.google.co.id/books?id=x0MbDQAAQBAJ>
- Gupta, S. K. (2019). *Drainage Engineering: Principles and Practices*. Scientific Publishers. Retrieved from <https://books.google.co.id/books?id=IxqVDwAAQBAJ>
- Holtz, R. D., Kovacs, W. D., & Sheahan, T. C. (1981). *An introduction to geotechnical engineering* (Vol. 733). Prentice-hall Englewood Cliffs, NJ.
- Huang, Y. H. (2004). *Pavement analysis and design* (Vol. 2). Pearson/Prentice Hall Upper Saddle River, NJ.
- Iduwin, T., Purnama, D. D., Putri, P. S., & Martono, H. S. (2020). Pengaruh Penggunaan Material Daur Ulang Terhadap Sifat Mekanik Beton Non Pasir. In *FORUM MEKANIKA* (Vol. 9, pp. 11–19).
- Indonesia, R. (2004). Undang-Undang (UU) Nomor 38 Tahun 2004 tentang Jalan. *Jakarta*, 1–43.
- Indrayani, I., Herius, A., Puryanto, P., Noerdin, R., Ismail, M., & Aisyah, S. (2022). Upaya Peningkatan Nilai CBR Tanah Lempung Menggunakan Campuran Kapur, Abu Sekam, dan Serat Fiber. *Cantilever: Jurnal Penelitian Dan Kajian Bidang Teknik Sipil*, 11(1), 49–54.
- Irawati, & Dewi, I. C. (2024). Modification of High-Quality Porous Concrete Asphalt with Local Materials as an Alternative to Flexible Pavement. *Reka Buana: Jurnal Ilmiah Teknik Sipil Dan Teknik Kimia*, 9(1), 81–94.
- Iriyena, P., Naukoko, A. T., & Siwu, H. F. D. J. (2019). Analisis pengaruh infrastruktur jalan terhadap pertumbuhan ekonomi di kabupaten kaimana 2007-2017. *Jurnal Berkala Ilmiah Efisiensi*, 19(02).
- Jenkins, K. J. (2023). Durability of bitumen-stabilized materials. *Journal of Testing and Evaluation*, 51(4), 1966–1986.
- Jones, D., Louw, S., & Wu, R. (2016). Full-depth reclamation: cost-effective rehabilitation strategy for low-volume roads. *Transportation Research Record*, 2591(1), 1–10.
- Joshaghani, A., & Shokrabadi, M. (2022). Ground penetrating radar (GPR) applications in concrete pavements. *International Journal of Pavement Engineering*, 23(13), 4504–4531.

- Kim, D., Jeon, J., & Kim, D. (2019). Predictive modeling of pavement damage using machine learning and big data processing. *Journal of the Korean Society of Hazard Mitigation*, 19(1), 95–107.
- Krisdiyanto, A., Dewi, K., & Wijayanto, M. A. (2022). Analisa Perbandingan Perencanaan Tebal Perkerasan Lentur Metode AASHTO 1993 Dan Tebal Perkerasan Lentur Metode Bina Marga 2017. *Jurnal Teknik Sipil*, 15(1), 22–33.
- Kumar, S., & Singh, S. K. (2023). Subgrade soil stabilization using geosynthetics: A critical review. *Materials Today: Proceedings*.
- Lie, D., Nainggolan, L. E., Nainggolan, N. T., Sembiring, L. D., & Silitonga, H. P. (2022). *Indeks Pembangunan Manusia Dengan Pertumbuhan Ekonomi*. CV Azka Pustaka. Retrieved from <https://books.google.co.id/books?id=fpdrEAAAQBAJ>
- Liu, D., Chen, J., & Li, S. (2019). Collaborative operation and real-time control of roller fleet for asphalt pavement compaction. *Automation in Construction*, 98, 16–29.
- Liu, Z., Sun, L., Li, J., & Liu, L. (2022). Effect of key design parameters on high temperature performance of asphalt mixtures. *Construction and Building Materials*, 348, 128651.
- Loprencipe, G., & Zoccali, P. (2017). Ride quality due to road surface irregularities: Comparison of different methods applied on a set of real road profiles. *Coatings*, 7(5), 59.
- Ma, Z., Zhang, J., Philbin, S. P., Li, H., Yang, J., Feng, Y., ... Skitmore, M. (2021). Dynamic quality monitoring system to assess the quality of asphalt concrete pavement. *Buildings*, 11(12), 577.
- Maha, M. R. A., Idham, M. K., Hainin, M. R., Naqibah, S. N., & Amirah, N. A. (2022). Application of Alternative Filler in Asphalt Mixture: An Overview from Indonesia Perspective. In *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science* (Vol. 971, p. 12005). IOP Publishing.
- Mahedi, M., Cetin, B., & White, D. J. (2020). Cement, lime, and fly ashes in stabilizing expansive soils: Performance evaluation and comparison. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 32(7), 4020177.
- Mallick, R. B., & El-Korchi, T. (2022). *Pavement Engineering: Principles and Practice*. CRC Press. Retrieved from <https://books.google.co.id/books?id=0-CgEAAAQBAJ>
- Mantiri, C. C., Sendow, T. K., & Manoppo, M. R. E. (2019). Analisa

- Tebal Perkerasan Lentur Jalan Baru Dengan Metode Bina Marga 2017 Dibandingkan Metode Aashto. *Jurnal Sipil Statik*, 7(10).
- Mariyappan, R., Palammal, J. S., & Balu, S. (2023). Sustainable use of *Reclaimed Asphalt Pavement (RAP)* in pavement applications—a review. *Environmental Science and Pollution Research*, 30(16), 45587–45606.
- Mousa, M., Elseifi, M. A., Bashar, M., Zhang, Z., & Gaspard, K. (2018). Field evaluation and cost effectiveness of crack sealing in flexible and *Composite Pavements*. *Transportation Research Record*, 2672(12), 51–61.
- Munsil, D. P. (2018). *Dasar Manajemen Konstruksi Proyek Jalan (Tatahapan Pre-Start)*. Deepublish. Retrieved from <https://books.google.co.id/books?id=G0hUEQAAQBAJ>
- Neville, A. M. (2011). *Properties of Concrete*. Pearson. Retrieved from <https://books.google.com.jm/books?id=TdfewmQ-cMIC>
- Oktaviastuti, B., Pandulu, G. D., & Lusyana, E. (2021). Kuat Tekan Beton Geopolymer Berbahan Dasar Abu Terbang (Fly Ash) Sebagai Alternatif Perkerasan Kaku di Daerah Pesisir. *Reka Buana J. Ilm. Tek. Sipil Dan Tek. Kim*, 6(1), 78–87.
- Papagiannakis, A. T., & Masad, E. A. (2024). *Pavement Design and Materials*. Wiley. Retrieved from <https://books.google.co.id/books?id=P18JEQAAQBAJ>
- Parwanto, A. (2011). Pemanfaatan Abu Sekam Padi Sebagai Bahan Stabilisasi Tanah Lempung dengan Perawatan 3 hari (Studi Kasus *Subgrade* Jalan Raya Tanon, Sragen). Universitas Muhammadiyah Surakarta.
- Qian, J., Chen, K., Tian, Y., Zeng, F., & Wang, L. (2019). Performance evaluation of flexible pavements with a lateritic gravel base using accelerated pavement testing. *Construction and Building Materials*, 228, 116790.
- Raharjo, N. D. (2022). *Dasar Perencanaan Geometrik Jalan Raya. Jember: Cerdas Ulet Kreatif*.
- Rahmaneta, S., Munirwansyah, M., & Chairullah, B. (2020). Pengaruh stabilisasi kapur terhadap parameter kuat geser tanah lempung ekspansif. *Journal of The Civil Engineering Student*, 2(1), 8–14.
- Rao, S. P. (2013). *Composite Pavement Systems*. Transportation Research Board. Retrieved from <https://books.google.co.id/books?id=o1zn2oqvQmEC>

- Rokade, S., Agarwal, P. K., & Shrivastava, R. (2012). Drainage and flexible pavement performance. *International Journal of Engineering Science and Technology (IJEST)*, 4(04), 1308–1311.
- Romadhon, F., & Garside, A. K. (2021). Aplikasi Perkerasan Jalan Raya Berkelanjutan Dengan Pemanfaatan Daur Ulang Agregat Beton: Tinjauan Literatur. In *Seminar Keinsinyuran Program Studi Program Profesi Insinyur* (Vol. 1).
- Rout, M. K. D., Biswas, S., Shubham, K., & Sinha, A. K. (2023). A systematic review on performance of *Reclaimed Asphalt Pavement* (RAP) as sustainable material in rigid pavement construction: Current status to future perspective. *Journal of Building Engineering*, 76, 107253.
- Sabri, I. L. M. (2015). Study on the impact of moisture content on *Subgrade* strength.
- Sanjay, R., Tejeshwini, S., Mamatha, K. H., & Dinesh, S. V. (2022). Comparative study on structural evaluation of flexible pavement using BBD and FWD. *Materials Today: Proceedings*, 60, 608–615.
- Sari, I. P. (2024). Studi Perbandingan Konstruksi Perkerasan Lentur dan Perkerasan Kaku Pada Ruas Jalan Nasional Buduran-Waru Sidoarjo Jawa Timur. Institut Teknologi Nasional Malang.
- Sasuwuk, G. K. G., Waani, J. E., & Rumayar, A. L. E. (2019). Analisa Kinerja Perkerasan Jalan Ditinjau Dari Besarnya Volume Kumulatif Lalu Lintas Dan Faktor Lingkungan Studi Kasus: Ruas Jalan Worang Bypass–Minahasa Utara. *Jurnal Sipil Statik*, 7(1).
- Sesaria, D. A. (2018). Pengaruh gradasi crumb rubber pada karakteristik campuran aspal. Universitas Sumatera Utara.
- Shu, S., Zhuang, C., Zhao, S., Hao, Y., Guo, H., & Ye, Y. (2022). Study of anti-stripping measures to improve the adhesion of asphalt to granite aggregates. *Coatings*, 12(12), 1954.
- Slat, V. B., Supit, S. W. M., & Kondo, N. (2021). Pengaruh Superplasticizer Polymer Terhadap Kuat Tekan Beton Mutu Tinggi. *Wahana Teknik Sipil: Jurnal Pengembangan Teknik Sipil*, 26(2), 115–123.
- Soelarso, & Baehaki, B. (2016). Pengaruh Penggunaan Limbah Beton Sebagai Pengganti Agregat Kasar Pada Beton Normal Terhadap Kuat Tekan Dan Modulus Elastisitas. *Fondasi: Jurnal Teknik Sipil*, 5(2).
- Solihu, H. (2020). Cement soil stabilization as an improvement

- technique for rail track *Subgrade*, and highway subbase and *Base Courses*: A review. *Journal of Civil and Environmental Engineering*, 10(3), 1–6.
- Sonawane, G., Mahajan, C., Nikale, A., & Dalvi, Y. (2018). Smart real-time drainage monitoring system using internet of things. *IRE Journals*, 1(11).
- Sukarno, E. W. (2022). Studi Kasus Perbandingan Efisiensi Biaya Antara Pekerjaan Jalan Perkerasan Kaku (Rigid Pavement) dengan Perkerasan Lentur (Flexible Pavement) di Kabupaten Ngawi. *Jurnal Impresi Indonesia*, 1(10), 1090–1101.
- Syuhada, A., Huzni, S., & Fuadi, Z. (2019). Study of temperature loss of Hot Mix Asphalt during transportation. In *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* (Vol. 523, p. 12083). IOP Publishing.
- Takulani, L. (2023). Stabilisasi tanah lempung ekspansif dengan campuran semen dan abu batok kelapa. Universitas Islam Sultan Agung Semarang.
- Terzaghi, K., Peck, R. B., & Mesri, G. (1996). *Soil Mechanics in Engineering Practice*. Wiley. Retrieved from <https://books.google.co.id/books?id=XjH6DwAAQBAJ>
- Titus-Glover, L., Darter, M. I., & Von Quintus, H. L. (2019). *Impact of environmental factors on pavement performance in the absence of heavy loads*. United States. Federal Highway Administration. Office of Infrastructure
- van Steenberg, F., Arroyo-Arroyo, F., Rao, K., Hulluka, T. A., Deligianni, A., & Woldearegay, K. (2021). *Green Roads for Water: Guidelines for Road Infrastructure in Support of Water Management and Climate Resilience*. World Bank Publications. Retrieved from <https://books.google.co.id/books?id=4GMzEAAAQBAJ>
- Wang, Y., Li, J., Zhang, X., Yao, Y., & Peng, Y. (2024). Recent Development in Intelligent Compaction for Asphalt Pavement Construction: Leveraging Smart Sensors and Machine Learning. *Sensors*, 24(9), 2777.
- Wu, S., Zhao, Z., Li, Y., Pang, L., Amirkhanian, S., & Riara, M. (2017). Evaluation of aging resistance of graphene oxide modified asphalt. *Applied Sciences*, 7(7), 702.
- Wulansari, I., Arba'in, M., Mustika, W., Kusuma, A., Abduh, N., &

- Muslimin, E. (2023). *Dasar-Dasar Transportasi*. TOHAR MEDIA. Retrieved from <https://books.google.co.id/books?id=9Je0EAAAQBAJ>
- Xu, Y. (2023). Data-driven methodologies for supporting decision-making in roadway safety and pavement management.
- Yaacob, H., Chang, F.-L., Rosli Hainin, M., & Jaya, R. P. (2015). Curing of asphalt emulsified tack coat subjected to Malaysian weather conditions. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 27(4), 4014147.
- Yang, H., Wu, J., Guo, C., Li, H., & Wu, Z. (2023). Effects of geotextile envelope and perforations on the performance of corrugated drain pipes. *International Journal of Agricultural and Biological Engineering*, 16(1), 36–44.
- Yoder, E. J., & Witczak, M. W. (1991). *Principles of Pavement Design*. Wiley. Retrieved from <https://books.google.co.id/books?id=UWBNPe6DeZ8C>
- Yunianta, A., & Setiadji, B. H. (2022). *Sistem drainase jalan raya yang berkelanjutan*. TOHAR MEDIA. Retrieved from <https://books.google.co.id/books?id=vLJ0EAAAQBAJ>
- Yunus, A. I., Suyadi, S., Priana, S. E., Roring, H. S. D., Kaharu, A., Achmad, F., ... Tumimomor, J. E. E. (2025). *Transportasi Perkerasan Jalan*. CV. Gita Lentera. Retrieved from <https://books.google.co.id/books?id=6KFZEQAAQBAJ>
- Zalaya, Y., Handayani, P., & Lestari, I. W. (2019). Pengelolaan limbah hasil konstruksi pada proyek pembangunan gedung. In *Forum Ilmiah* (Vol. 16, pp. 63–73).
- Zentino, H., Sivananda, O. D., Wulandari, P. S., & Patmadjaja, H. (2017). Pengaruh Penambahan Serat Ijuk terhadap Stabilitas Campuran Aspal Emulsi Dingin. *Jurnal Dimensi Pratama Teknik Sipil*, 6(1).
- Zhu, S., Li, X., Wang, H., & Yu, D. (2018). Development of an automated remote asphalt paving quality control system. *Transportation Research Record*, 2672(26), 28–39.



GLOSARIUM

- Asp:** Bahan hitam lengket hasil olahan minyak bumi yang digunakan sebagai lapisan pengikat dalam konstruksi jalan beraspal untuk meningkatkan daya tahan terhadap beban lalu lintas.
- Tan:** Permukaan alami bumi yang menjadi dasar pijakan konstruksi jalan dan harus dipadatkan serta diperkuat agar menopang beban kendaraan secara stabil.
- Pas:** Material butiran halus, seperti pasir, yang digunakan sebagai bahan campuran dalam pembuatan beton dan aspal serta sebagai lapisan drainase atau alas.
- Ker:** Elemen struktur di tepi jalan yang berfungsi membatasi area perkerasan, mencegah gerusan air, dan menjaga keselamatan pengguna jalan.
- Uji:** Proses evaluasi atau pengujian kualitas material atau struktur perkerasan jalan menggunakan alat dan metode tertentu untuk memastikan kesesuaian standar teknis.
- Las:** Teknik penyambungan bagian logam, seperti komponen alat berat atau struktur penyangga, menggunakan panas tinggi agar menyatu kuat dan tahan lama.
- Pad:** Kondisi tingkat kepadatan suatu lapisan tanah atau material yang diukur untuk memastikan kestabilan dan kekuatan struktur jalan.

Tur:	Fenomena penurunan permukaan badan jalan akibat beban berulang atau pergeseran tanah dasar yang kurang padat atau tidak stabil.
Lek:	Deformasi lokal pada permukaan jalan yang membentuk cekungan kecil dan dapat menampung air, mengganggu kenyamanan serta membahayakan kendaraan.
Sis:	Area samping badan jalan yang mengarah ke bahu atau drainase, berfungsi sebagai penopang tambahan serta jalur evakuasi darurat.
Bas:	Lapis pondasi bawah berupa campuran agregat kasar dan halus yang berfungsi mendistribusikan beban dari lapisan atas ke tanah dasar.
Top:	Lapis permukaan paling atas dari struktur jalan yang langsung bersentuhan dengan roda kendaraan dan didesain tahan aus dan cuaca.
Mix:	Proses pencampuran agregat, aspal, dan bahan tambahan lainnya untuk menghasilkan material perkerasan yang homogen dan berkinerja tinggi.
Pad:	Alat pemadat mekanis seperti stamper atau roller yang digunakan untuk meningkatkan kepadatan tanah atau aspal demi kekuatan struktur.
Gul:	Alat berat dengan roda silinder besar yang digunakan dalam pemadatan lapisan perkerasan atau tanah agar struktur menjadi padat dan stabil.



INDEKS

A

aksesibilitas, 1

audit, 109

B

big data, 213

D

distribusi, 1, 2, 12, 23, 26, 32, 33,
48, 50, 56, 57, 59, 70, 71, 74,
92, 101, 113, 120, 127, 173,
174, 203

E

ekonomi, 1, 2, 3, 7, 73, 201, 203,
212

ekspansi, 45, 46, 72, 124, 127,
128, 149, 181

emisi, 41, 47, 50, 51, 73, 175, 190

empiris, 24, 66, 68, 149

F

fiskal, 204

fleksibilitas, 2, 7, 11, 40, 52, 84,
102

fluktuasi, 72, 176

fundamental, 3, 19, 27

G

geografis, 18, 201

I

infrastruktur, 1, 2, 3, 4, 15, 16, 17,
19, 27, 31, 35, 41, 47, 55, 59,
66, 68, 86, 144, 146, 147, 184,
191, 200, 201, 203, 205, 212

inovatif, 65, 146, 190

integrasi, 1, 200

integritas, 117, 122, 127, 129, 130,
131, 148, 172, 186

internet of things, 216

investasi, 17

K

komprehensif, 36, 97, 174, 191,
206, 208

konsistensi, 37, 50, 109, 136, 137,
139, 140

M

manufaktur, 2

metodologi, 23

P

politik, 3
proyeksi, 56, 57, 70, 206

R

rasional, 142
real-time, 42, 108, 146, 205, 206,
213, 216
regulasi, 49

S

stabilitas, 9, 10, 12, 21, 27, 30, 32,
34, 35, 38, 47, 48, 53, 58, 60,
61, 69, 81, 83, 84, 100, 103,
110, 113, 116, 146, 156, 157,
164, 168, 169, 172, 197

T

transparansi, 205

U

universal, 138

BIOGRAFI PENULIS



Ir. Muhammad Rizka Fadli Wibowo, S.T., M.T.

Lahir di Baturaja, 28 Juli 1997. Menyelesaikan Studi S2 Magister Teknik Sipil pada Program Pascasarjana Universitas Sriwijaya tahun 2023. Penulis bekerja sebagai Pengajar di Universitas Baturaja pada Program Studi Teknik Sipil, Selain mengajar, penulis juga menjadi Direktur Utama PT. Bintang Baturaja Karya Perusahaan Bidang Jasa Konsultan Konstruksi yang berada di Baturaja.



Ir. Hj. Lindawati, MZ., M.T.

Lahir di Baturaja, 13 November 1964. Lulus S2 di Program Studi Magister Teknik Sipil Universitas Sriwijaya tahun 2012. Saat ini sebagai Dosen di Universitas Baturaja pada Program Studi Teknik Sipil.



Ir. Balqis Fataya Said, S.T., M.T.

Lahir di Palembang, 20 Juli 1999. Menyelesaikan Studi S2 Magister Teknik Sipil dengan Konsentrasi Keahlian Rekayasa dan Manajemen Infrastruktur di Institut Teknologi Bandung pada tahun 2023. Penulis bekerja sebagai Dosen di Universitas Sriwijaya pada Program Studi Teknik Sipil. Aktif sebagai pembicara di bidang organisasi.

KONSTRUKSI PERKERASAN JALAN

STANDAR, MATERIAL, DAN TEKNIK LAPANGAN

Buku referensi "Konstruksi Perkerasan Jalan: Standar, Material, dan Teknik Lapangan" merupakan buku panduan komprehensif yang membahas aspek teknis dan praktis dalam pembangunan jalan, khususnya perkerasan. Buku referensi ini membahas jenis-jenis perkerasan (lentur dan kaku), spesifikasi material konstruksi seperti agregat, aspal, dan beton, serta tahapan pelaksanaan di lapangan berdasarkan standar nasional dan internasional. Buku referensi ini membahas metode perencanaan, pemilihan material yang tepat, prosedur pengujian kualitas, hingga teknik pelaksanaan dan pengendalian mutu di lapangan. Selain itu, buku referensi ini juga membahas studi kasus dan contoh perhitungan teknis untuk memperkuat pemahaman pembaca terhadap aplikasi nyata di proyek konstruksi jalan.