

*Buku Referensi*

# **PERKERASAN JALAN RAYA**

## **TEORI, DESAIN, DAN APLIKASI**



**Dr. Ir. Nusa Sebayang, M.T.  
Ir. Taufikkurrahman, S.T., M.T.  
Ir. Lila Kurnia Wardani, S.T., M.T.  
Ir. Muhammad Isradi, S.T., M.T., Ph.D., IPM.**



# **BUKU REFERENSI**

# **PERKERASAN JALAN**

# **RAYA**

# **TEORI, DESAIN, DAN**

# **APLIKASI**

**Dr. Ir. Nusa Sebayang, M.T.**

**Ir. Taufikkurrahman, S.T., M.T.**

**Ir. Lila Kurnia Wardani, S.T., M.T.**

**Ir. Muhammad Isradi, S.T., M.T., Ph.D., IPM.**



# **PERKERASAN JALAN RAYA**

## **TEORI, DESAIN, DAN APLIKASI**

---

Ditulis oleh:

Dr. Ir. Nusa Sebayang, M.T.  
Ir. Taufikkurrahman, S.T., M.T.  
Ir. Lila Kurnia Wardani, S.T., M.T.  
Ir. Muhammad Isradi, S.T., M.T., Ph.D., IPM.

---

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

---



ISBN: 978-634-7457-39-4  
IV + 260 hlm; 18,2 x 25,7 cm.  
Cetakan I, Desember 2025

**Desain Cover dan Tata Letak:**  
Ajrina Putri Hawari, S.AB.

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](mailto:ptmediapenerbitindonesia@gmail.com)  
Web: <https://mediapenerbitindonesia.com>  
Anggota IKAPI No.088/SUT/2024



# KATA PENGANTAR

---

Jalan merupakan komponen vital dalam sistem transportasi nasional yang berfungsi sebagai penghubung antarwilayah, pendukung mobilitas manusia, serta penggerak utama aktivitas ekonomi dan sosial. Kualitas jalan yang baik mencerminkan tingkat kemajuan suatu bangsa karena berpengaruh langsung terhadap efisiensi logistik, keselamatan pengguna, serta kenyamanan perjalanan. Oleh sebab itu, perencanaan dan pembangunan perkerasan jalan menuntut pendekatan ilmiah yang memperhatikan aspek teknis, ekonomi, dan keberlanjutan lingkungan.

Buku referensi “Perkerasan Jalan Raya: Teori, Desain, dan Aplikasi” membahas konsep dan prinsip dasar perkerasan jalan sebagai bagian penting dari sistem transportasi. Buku referensi ini membahas pengenalan fungsi, klasifikasi, serta struktur perkerasan yang menjadi dasar dalam perencanaan dan pembangunan infrastruktur jalan yang andal. Selanjutnya, buku referensi ini membahas berbagai metode desain perkerasan, baik lentur maupun kaku, beserta karakteristik material yang digunakan seperti tanah dasar, agregat, aspal, dan beton.

Semoga buku referensi ini dapat menjadi sumber ilmu dan inspirasi bagi mahasiswa, dosen, praktisi, serta pihak lain yang bergerak di bidang transportasi dan rekayasa jalan.

Salam Hangat,

**Penulis**

# DAFTAR ISI

---

---

<b>KATA PENGANTAR .....</b>	i
<b>DAFTAR ISI .....</b>	ii
<b>BAB I PENDAHULUAN .....</b>	<b>1</b>
A. Definisi dan Fungsi Jalan.....	1
B. Klasifikasi Jalan (Fungsi, Status, Struktur) .....	4
C. Komponen Struktur Perkerasan Jalan.....	7
D. Pentingnya Desain Perkerasan.....	11
E. Tantangan dan Isu Terkini dalam Teknologi Perkerasan ..	13
<b>BAB II DASAR TEORI PERKERASAN JALAN.....</b>	<b>19</b>
A. Konsep Beban dan Respon Perkerasan.....	19
B. Karakteristik Lalu Lintas (ESAL, Spektrum Beban).....	22
C. Teori Mekanika Bahan untuk Perkerasan.....	26
D. Teori Lapisan Sistem ( <i>Layered Elastic System</i> ) .....	32
E. Teori Fatigue dan Rutting .....	38
F. Pengaruh Lingkungan terhadap Perkerasan.....	44
<b>BAB III JENIS PERKERASAN JALAN .....</b>	<b>47</b>
A. Perkerasan Lentur ( <i>Flexible Pavement</i> ).....	47
B. Perkerasan Kaku ( <i>Rigid Pavement</i> ) .....	53
C. Perkerasan Komposit .....	59
D. Perbandingan Kinerja dan Biaya .....	66
<b>BAB IV MATERIAL UNTUK PERKERASAN .....</b>	<b>71</b>
A. Tanah Dasar (Subgrade) .....	71
B. Agregat (Base, Subbase).....	78
C. Aspal: Jenis, Sifat, dan Modifikasi .....	82
D. Semen dan Beton untuk Perkerasan Kaku .....	87

E.	Material Inovatif: Geosintetik, RAP, dan Material Hijau..	91
<b>BAB V</b>	<b>PERANCANGAN PERKERASAN LENTUR.....</b>	<b>97</b>
A.	Pendekatan Desain Empiris vs Mekanis-Empiris.....	97
B.	Metode AASHTO 1993 .....	101
C.	Metode Manual Desain Perkerasan Jalan (MDPJ – Indonesia) .....	106
D.	Perhitungan Tebal Lapisan .....	110
E.	Analisis dan Evaluasi Performa.....	112
<b>BAB VI</b>	<b>PERANCANGAN PERKERASAN KAKU .....</b>	<b>119</b>
A.	Prinsip Dasar Desain Rigid Pavement.....	119
B.	Jenis-Jenis Slab Beton (JPCP, JRCP, CRCP).....	123
C.	Metode AASHTO dan PCA .....	127
D.	Desain Sendi dan Dowel.....	132
E.	Kontrol Retak dan Deformasi.....	136
<b>BAB VII</b>	<b>KONSTRUKSI PERKERASAN .....</b>	<b>145</b>
A.	Tahapan Konstruksi Perkerasan Lentur.....	145
B.	Tahapan Konstruksi Perkerasan Kaku.....	147
C.	Standar dan Spesifikasi Teknis.....	151
D.	Alat dan Mesin Konstruksi .....	155
E.	Manajemen Mutu Konstruksi .....	159
<b>BAB VIII</b>	<b>PEMELIHARAAN DAN REHABILITASI .....</b>	<b>163</b>
A.	Jenis-jenis Kerusakan Perkerasan.....	163
B.	Strategi Pemeliharaan (Rutin, Berkala, Rehabilitasi) .....	168
C.	Teknik Overlay dan Resurfacing .....	172
D.	Teknologi Rehabilitasi Modern .....	175
E.	Sistem Manajemen Perkerasan (PMS) .....	180
<b>BAB IX</b>	<b>EVALUASI DAN MONITORING KONDISI PERKERASAN.....</b>	<b>189</b>
A.	Survei Visual dan Manual .....	190
B.	Metode Defleksi (FWD, Benkelman Beam) .....	195
C.	Indeks Kondisi (PCI, IRI, dll.) .....	199

D.	Instrumentasi dan Sensor.....	204
E.	Integrasi Teknologi GIS dan IoT .....	209
<b>BAB X TANTANGAN MASA DEPAN DAN INOVASI TEKNOLOGI .....</b>		<b>215</b>
A.	<i>Green Pavement</i> dan Teknologi Berkelanjutan.....	215
B.	<i>Smart Pavement</i> dan Jalan Berbasis Sensor .....	219
C.	Perkerasan untuk Kendaraan Listrik dan Otonom.....	226
D.	Daur Ulang Material Jalan ( <i>Recycling</i> ) .....	231
E.	Perkerasan Modular dan Prefabrikasi.....	236
<b>BAB XI KESIMPULAN .....</b>		<b>243</b>
<b>DAFTAR PUSTAKA .....</b>		<b>245</b>
<b>GLOSARIUM.....</b>		<b>253</b>
<b>INDEKS .....</b>		<b>257</b>
<b>BIOGRAFI PENULIS.....</b>		<b>259</b>
<b>SINOPSIS .....</b>		<b>260</b>



# BAB I

## PENDAHULUAN

---

---

Jalan merupakan elemen fundamental dalam sistem transportasi dan infrastruktur suatu negara, berperan sebagai penghubung antarwilayah, fasilitator mobilitas manusia, distribusi barang, serta penggerak pertumbuhan ekonomi. Kualitas jalan yang baik berkontribusi langsung pada efisiensi transportasi, keselamatan, dan kenyamanan pengguna. Oleh karena itu, perencanaan, desain, konstruksi, dan pemeliharaan perkerasan jalan harus mengacu pada prinsip-prinsip teknis yang kuat serta memperhatikan aspek sosial, ekonomi, dan lingkungan. Pendahuluan ini memberikan landasan pemahaman mengenai konsep perkerasan jalan serta pentingnya kajian menyeluruh dalam upaya menghasilkan jalan yang aman, tahan lama, dan berkelanjutan.

Bab ini membahas pengertian jalan, klasifikasi jalan berdasarkan fungsi dan status, struktur perkerasan jalan, hingga urgensi desain perkerasan sebagai tahap awal pembangunan. Selain itu, bab ini juga menyinggung isu-isu terkini yang memengaruhi bidang perkerasan jalan, seperti perubahan iklim, perkembangan teknologi, serta kebutuhan akan infrastruktur yang ramah lingkungan. Dengan memahami ruang lingkup ini, pembaca dapat melihat hubungan antara teori perkerasan jalan dan aplikasinya dalam praktik konstruksi, pemeliharaan, serta inovasi teknologi.

### A. Definisi dan Fungsi Jalan

Jalan merupakan salah satu infrastruktur transportasi paling vital dalam mendukung kehidupan sosial, ekonomi, dan budaya suatu masyarakat. Menurut Undang-Undang Nomor 38 Tahun 2004 tentang Jalan, jalan didefinisikan sebagai prasarana transportasi darat yang meliputi segala bagian jalan, termasuk bangunan pelengkap dan

perlengkapannya, yang diperuntukkan bagi lalu lintas, baik kendaraan maupun pejalan kaki. Definisi ini menegaskan bahwa jalan tidak hanya terbatas pada perkerasan, tetapi juga mencakup fasilitas pendukung seperti drainase, marka, rambu, hingga jembatan penyeberangan.

Secara teknis, jalan adalah jalur transportasi darat yang dibangun untuk menghubungkan satu lokasi dengan lokasi lain, memungkinkan mobilitas barang, jasa, maupun manusia (Robinson & Thagesen, 2018). Di Indonesia, jalan diklasifikasikan berdasarkan fungsi (arteri, kolektor, lokal, lingkungan), berdasarkan status (nasional, provinsi, kabupaten/kota, desa), dan berdasarkan kelas jalan (sesuai dengan beban muatan kendaraan yang diizinkan).

Pada perspektif rekayasa transportasi, Huang (2004) mendefinisikan jalan sebagai struktur rekayasa yang dirancang untuk mendistribusikan beban lalu lintas secara aman dan efisien ke tanah dasar. Dengan demikian, jalan tidak hanya dipandang sebagai jalur fisik, tetapi juga sebagai suatu sistem rekayasa kompleks yang melibatkan aspek geoteknik, material, desain struktural, dan manajemen lalu lintas.

Seiring dengan perkembangan teknologi, definisi jalan juga mengalami perluasan. Konsep smart road menjelaskan jalan sebagai infrastruktur cerdas yang dilengkapi sensor, jaringan komunikasi, serta teknologi digital untuk mendukung keamanan, efisiensi, dan keberlanjutan transportasi. Hal ini menunjukkan bahwa jalan modern tidak hanya sekadar prasarana fisik, tetapi juga platform teknologi. Jalan memiliki berbagai fungsi yang saling berkaitan. Secara umum, fungsi jalan dapat dikelompokkan menjadi fungsi mobilitas, fungsi ekonomi, fungsi sosial, fungsi strategis, dan fungsi ekologis.

## 1. Fungsi Mobilitas

Fungsi utama jalan adalah memfasilitasi mobilitas manusia dan barang. Jalan memungkinkan pergerakan dari satu titik ke titik lain dengan lebih cepat, efisien, dan terjangkau. TRB (2021) menegaskan bahwa jaringan jalan yang baik akan meningkatkan aksesibilitas, menurunkan biaya transportasi, serta memperpendek waktu tempuh. Di negara berkembang seperti Indonesia, jalan merupakan moda transportasi paling dominan. Data BPS (2022) menunjukkan bahwa lebih dari 90% pergerakan logistik nasional dilakukan melalui jaringan jalan. Hal ini menjadikan perkerasan jalan raya sebagai tulang punggung mobilitas nasional.

## **2. Fungsi Ekonomi**

Jalan adalah pendorong utama pertumbuhan ekonomi. Pembangunan infrastruktur jalan yang memadai dapat meningkatkan efisiensi rantai pasok, memperkuat konektivitas antarwilayah, dan mendorong investasi. Jalan memfasilitasi arus barang dari sentra produksi ke pasar, sehingga menekan biaya distribusi dan meningkatkan daya saing. Studi World Bank (2019) menyebutkan bahwa setiap 1% peningkatan investasi pada jaringan jalan dapat mendorong pertumbuhan ekonomi sebesar 0,3–0,5%. Di Indonesia, program pembangunan Jalan Tol Trans Jawa dan Trans Sumatera terbukti meningkatkan distribusi barang, efisiensi logistik, serta membuka peluang ekonomi baru di wilayah sekitar koridor jalan (Kementerian PUPR, 2020).

## **3. Fungsi Sosial**

Jalan juga memiliki fungsi sosial yang penting. Jalan menjadi sarana interaksi masyarakat, memperkuat integrasi sosial, dan memperluas akses terhadap layanan dasar seperti pendidikan, kesehatan, dan fasilitas publik. Masyarakat di daerah terpencil yang mendapatkan akses jalan lebih baik biasanya mengalami peningkatan taraf hidup, akses pendidikan, dan pemerataan pelayanan publik (Douglas, 2018). Lebih jauh, jalan juga berperan dalam memperkuat identitas nasional. Jalan trans-nasional atau jalan lintas provinsi menghubungkan wilayah yang berbeda, sehingga memperkuat integrasi sosial dan politik.

## **4. Fungsi Strategis dan Pertahanan**

Jalan memiliki fungsi strategis dalam mendukung pertahanan dan keamanan suatu negara. Jaringan jalan raya merupakan bagian dari strategic national defense highway system yang berfungsi sebagai jalur mobilisasi militer, distribusi logistik, dan evakuasi bencana. Di Indonesia, pembangunan jalan perbatasan dan jalan strategis nasional tidak hanya berfungsi untuk konektivitas ekonomi, tetapi juga untuk memperkuat kedaulatan negara. Jalan perbatasan di Kalimantan dan Papua misalnya, selain membuka akses bagi masyarakat, juga berfungsi sebagai garis depan pertahanan negara.

## **5. Fungsi Ekologis dan Lingkungan**

Jalan juga memiliki fungsi ekologis. Pembangunan jalan dapat memengaruhi tata guna lahan, ekosistem, dan keseimbangan lingkungan.

Oleh karena itu, desain jalan modern semakin diarahkan pada konsep green road atau jalan berwawasan lingkungan, yaitu jalan yang memperhatikan aspek drainase berkelanjutan, penggunaan material ramah lingkungan, serta mitigasi dampak ekologis (Anthonissen & Braet, 2016). Jalan berpori (*permeable pavement*) misalnya, tidak hanya berfungsi sebagai jalur transportasi, tetapi juga sebagai sarana konservasi air tanah dan pengendalian banjir perkotaan. Dengan demikian, fungsi jalan tidak hanya terbatas pada mobilitas dan ekonomi, tetapi juga pada keberlanjutan lingkungan.

## B. Klasifikasi Jalan (Fungsi, Status, Struktur)

Klasifikasi jalan merupakan aspek mendasar dalam perencanaan, pembangunan, dan pengelolaan infrastruktur transportasi darat. Jalan tidak hanya dipandang sebagai jalur fisik untuk pergerakan kendaraan, melainkan sebagai sistem terintegrasi yang harus dirancang berdasarkan fungsinya, status pengelolaan, dan struktur perkerasannya (Robinson & Thagesen, 2018). Dengan klasifikasi yang tepat, pemerintah maupun otoritas jalan dapat menentukan standar teknis, prioritas pembangunan, hingga strategi pemeliharaan. Menurut UU No. 38 Tahun 2004 tentang Jalan, klasifikasi jalan di Indonesia dibagi berdasarkan tiga aspek utama: fungsi jalan, status jalan, dan kelas jalan. Sementara itu, dari sudut pandang rekayasa sipil, jalan juga dibedakan berdasarkan struktur perkerasannya: lentur, kaku, dan komposit.

### 1. Klasifikasi Jalan Berdasarkan Fungsi

Fungsi jalan berkaitan erat dengan peran jalan dalam melayani lalu lintas dan mobilitas. Jalan dirancang sesuai dengan tingkat pelayanan, volume lalu lintas, dan hubungan antarwilayah.

#### a. Jalan Arteri

Jalan arteri adalah jalan utama dengan fungsi melayani angkutan jarak jauh, volume lalu lintas tinggi, serta kecepatan perjalanan tinggi. Di Indonesia, jalan arteri dibagi menjadi arteri primer (menghubungkan kota utama dalam jaringan jalan nasional) dan arteri sekunder (menghubungkan kawasan perkotaan). Menurut Kementerian PUPR (2020), jalan arteri primer harus memenuhi standar geometrik tinggi, dengan hambatan samping minimal,

serta mengutamakan kelancaran arus lalu lintas. Jalan tol termasuk dalam kategori arteri primer.

b. Jalan Kolektor

Jalan kolektor berfungsi menghubungkan arteri dengan jalan lokal, serta melayani perjalanan jarak sedang dengan kecepatan menengah. Jalan kolektor memungkinkan distribusi lalu lintas dari pusat kegiatan menuju kawasan sekitarnya. Kolektor primer menghubungkan kota menengah dengan kota kecil, sedangkan kolektor sekunder menghubungkan kawasan perkotaan dengan lingkungan permukiman. Fungsi jalan kolektor seringkali dihadapkan pada permasalahan kapasitas karena adanya campuran lalu lintas antarwilayah dan lokal.

c. Jalan Lokal

Jalan lokal melayani perjalanan jarak dekat dengan kecepatan rendah. Fungsi utamanya adalah melayani akses menuju kawasan permukiman, fasilitas publik, maupun pusat kegiatan kecil. Jalan lokal sering menghadapi kerusakan dini akibat beban berlebih kendaraan niaga yang tidak seharusnya melewati jalan tersebut. Oleh karena itu, pengaturan akses kendaraan berat menjadi penting.

d. Jalan Lingkungan

Jalan lingkungan adalah jalan dengan fungsi melayani aktivitas sehari-hari masyarakat di tingkat perumahan atau desa. Standar teknis jalan lingkungan lebih sederhana dibandingkan jalan arteri atau kolektor. Namun, peran sosialnya sangat penting, karena jalan ini menjadi sarana interaksi dan akses dasar masyarakat pedesaan (Zhu et al., 2021).

## 2. Klasifikasi Jalan Berdasarkan Status

Klasifikasi berdasarkan status menunjukkan tanggung jawab pengelolaan dan kewenangan.

a. Jalan Nasional

Dikelola oleh pemerintah pusat, jalan nasional berfungsi melayani pergerakan antarprovinsi, antar-ibu kota provinsi, serta kawasan strategis nasional. Jalan tol termasuk dalam kategori ini. Data BPS (2022) menunjukkan bahwa panjang jalan nasional di Indonesia mencapai lebih dari 47.000 km, dengan sebagian besar

berupa jalan arteri dan kolektor primer. Jalan nasional menjadi tulang punggung distribusi logistik nasional.

b. Jalan Provinsi

Dikelola oleh pemerintah provinsi, jalan provinsi berfungsi melayani pergerakan antaribu kota kabupaten/kota dalam satu provinsi, serta mendukung konektivitas antarwilayah dalam provinsi (Atmanegara, 2017).

c. Jalan Kabupaten/Kota

Dikelola oleh pemerintah kabupaten/kota, jalan ini melayani pergerakan antaribu kota kecamatan atau desa, serta aktivitas ekonomi lokal. Tantangan utama pada jalan kabupaten/kota adalah keterbatasan dana pemeliharaan sehingga banyak ruas mengalami kerusakan.

d. Jalan Desa

Dikelola oleh pemerintah desa, jalan ini berfungsi melayani mobilitas masyarakat pedesaan dan akses ke pusat produksi pertanian. Meski sederhana, jalan desa memiliki peran penting dalam pemerataan pembangunan.

### 3. Klasifikasi Jalan Berdasarkan Struktur Perkerasan

Jalan juga diklasifikasikan berdasarkan struktur perkerasannya. Perkerasan jalan adalah lapisan konstruksi yang dibangun di atas tanah dasar untuk menyalurkan beban lalu lintas ke tanah pendukung (Huang, 2004).

a. Perkerasan Lentur (*Flexible Pavement*)

Perkerasan lentur menggunakan material berikat aspal sebagai lapisan permukaan. Lapisan ini bersifat lentur sehingga mampu menyesuaikan deformasi tanah dasar (Gonçalves & Margarido, 2016).

Kelebihan: biaya awal relatif murah, konstruksi lebih cepat.

Kekurangan: umur lebih pendek dan membutuhkan pemeliharaan rutin.

b. Perkerasan Kaku (*Rigid Pavement*)

Perkerasan kaku menggunakan beton semen Portland (PCC) sebagai lapisan utama. Karakteristiknya lebih kaku sehingga distribusi beban lebih merata (Mehta & Monteiro, 2006).

Kelebihan: umur lebih panjang (20–30 tahun), perawatan lebih sedikit. Kekurangan: biaya awal tinggi, waktu konstruksi lama.

c. Perkerasan Komposit

Merupakan kombinasi perkerasan kaku dan lentur. Umumnya digunakan untuk meningkatkan kinerja struktural dan memperpanjang umur jalan.

d. Perkerasan Inovatif

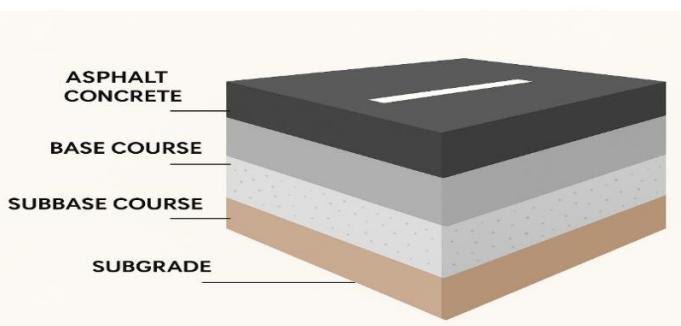
Kini berkembang perkerasan inovatif seperti:

- 1) Perkerasan berpori (*permeable pavement*) → mendukung drainase perkotaan.
- 2) Perkerasan fotovoltaik → menghasilkan energi terbarukan.
- 3) Perkerasan ramah lingkungan dengan material daur ulang.

### C. Komponen Struktur Perkerasan Jalan

Perkerasan jalan merupakan elemen kunci dalam infrastruktur transportasi darat yang berfungsi menyalurkan beban lalu lintas dari permukaan jalan ke tanah dasar dengan aman, nyaman, dan ekonomis. Struktur perkerasan jalan terdiri atas beberapa lapisan yang dirancang sedemikian rupa untuk mendistribusikan beban kendaraan agar tidak melebihi daya dukung tanah dasar (Gonçalves & Margarido, 2016). Menurut AASHTO (2015), perkerasan jalan secara umum terdiri dari lapisan permukaan (*surface course*), lapisan pondasi atas (*base course*), lapisan pondasi bawah (*subbase course*), dan tanah dasar (*subgrade*). Dalam konteks rekayasa jalan raya di Indonesia, klasifikasi komponen struktur perkerasan juga mengacu pada SNI 1732:2017 tentang Perencanaan Tebal Perkerasan Lentur Jalan Raya.

Komponen ini tidak hanya berfungsi struktural, tetapi juga memiliki fungsi fungsional, seperti kenyamanan berkendara, keselamatan, hingga mendukung keberlanjutan lingkungan melalui penggunaan material ramah lingkungan.



## **1. Komponen Utama Struktur Perkerasan Jalan**

### a. Lapisan Permukaan (*Surface Course*)

Lapisan permukaan merupakan lapisan teratas dari struktur perkerasan yang langsung bersentuhan dengan beban kendaraan dan kondisi lingkungan. Fungsinya antara lain:

- 1) Menyediakan permukaan yang rata dan nyaman.
- 2) Menyediakan daya dukung awal terhadap beban lalu lintas.
- 3) Melindungi lapisan di bawahnya dari infiltrasi air dan kerusakan mekanis.

Lapisan permukaan biasanya terbuat dari campuran beraspal (*hot mix asphalt*) pada perkerasan lentur, atau beton semen Portland pada perkerasan kaku. Campuran aspal dengan agregat halus dan kasar yang baik mampu meningkatkan ketahanan terhadap deformasi permanen. Sementara itu pada perkerasan kaku, kualitas campuran beton sangat menentukan daya tahan terhadap retak akibat beban berulang. Perkembangan terbaru juga memperkenalkan asphalt modifier berbasis polimer, karet alam, dan plastik daur ulang yang dapat meningkatkan ketahanan lapisan permukaan terhadap suhu tinggi dan beban berat.

### b. Lapisan Pondasi Atas (*Base Course*)

Lapisan pondasi atas terletak di bawah lapisan permukaan, berfungsi sebagai penopang utama yang menyalurkan beban ke lapisan pondasi bawah. Fungsinya meliputi:

- 1) Menambah kekuatan struktural perkerasan.
- 2) Memberikan kestabilan terhadap deformasi.
- 3) Melindungi lapisan subbase dan subgrade dari tekanan berlebih.

Material lapisan pondasi atas biasanya berupa agregat bergradasi baik (*crushed stone*, *crushed gravel*), atau campuran stabilisasi dengan semen, kapur, maupun aspal. Arshad dan Ahmed (2017) menunjukkan bahwa penggunaan material daur ulang aspal (RAP) pada lapisan *base course* dapat meningkatkan efisiensi biaya tanpa mengurangi kualitas struktural. Sementara itu, digitalisasi desain perkerasan dengan *Building Information Modelling* (BIM) mampu membantu optimasi pemilihan material base.

c. Lapisan Pondasi Bawah (*Subbase Course*)

Lapisan pondasi bawah adalah lapisan opsional yang berada di antara base course dan tanah dasar. Fungsinya antara lain:

- 1) Menyediakan peralihan distribusi beban agar tidak langsung diteruskan ke subgrade.
- 2) Mencegah masuknya partikel halus dari tanah dasar ke lapisan atas (fungsi filter).
- 3) Meningkatkan drainase untuk mengurangi potensi kerusakan akibat air.

Subbase biasanya menggunakan material granular seperti kerikil, batu pecah, atau tanah yang distabilisasi. Subbase berperan penting dalam sistem drainase jalan perkotaan, terutama dengan konsep permeable pavement untuk mengurangi genangan air.

d. Tanah Dasar (*Subgrade*)

Tanah dasar adalah lapisan paling bawah yang menjadi tumpuan seluruh struktur perkerasan. Kualitas tanah dasar sangat menentukan tebal lapisan di atasnya. Menurut SNI 1732:2017, tanah dasar harus diuji sifat mekaniknya melalui CBR (*California Bearing Ratio*) untuk menentukan daya dukungnya. Nilai CBR rendah mengharuskan penambahan tebal lapisan di atasnya. Perubahan iklim, terutama curah hujan ekstrem, dapat menurunkan daya dukung subgrade karena peningkatan kelembaban tanah. Oleh karena itu, stabilisasi subgrade dengan kapur, semen, atau geosintetik menjadi solusi yang umum.

## 2. Lapisan Tambahan pada Struktur Perkerasan

Terdapat lapisan tambahan yang berfungsi meningkatkan performa jalan:

- a. Lapisan Tanah Dasar yang Ditinggikan (*Embankment*): Embankment adalah timbunan tanah yang digunakan untuk meninggikan elevasi jalan. Kualitas tanah timbunan harus memenuhi standar tertentu agar tidak menimbulkan penurunan berlebih.
- b. Lapisan Drainase: Sistem drainase dalam perkerasan sangat penting untuk mengendalikan infiltrasi air. 80% kerusakan dini perkerasan lentur disebabkan oleh masuknya air ke dalam struktur perkerasan. Penggunaan lapisan drainase (*drainage layer*) dapat mempercepat aliran air keluar dari perkerasan (Lu et al., 2023).

- c. Lapisan Geosintetik: Penggunaan geotextile, geogrid, atau geomembrane sebagai lapisan tambahan mampu meningkatkan stabilitas dan memperpanjang umur jalan. Penelitian terbaru menunjukkan bahwa geosintetik juga mampu mengurangi tebal lapisan granular yang dibutuhkan, sehingga lebih hemat biaya.

### 3. Hubungan Antar Lapisan

Setiap lapisan dalam struktur perkerasan jalan memiliki fungsi spesifik yang saling mendukung sehingga dapat membentuk sistem berlapis yang utuh. Lapisan permukaan berfungsi utama untuk menahan beban lalu lintas langsung, sekaligus melindungi lapisan di bawahnya dari penetrasi air. Jika lapisan ini tidak cukup kedap, kelembaban dapat masuk ke dalam base dan subbase sehingga menurunkan kekuatan serta meningkatkan risiko deformasi permanen. Oleh karena itu, pemilihan material, kualitas konstruksi, dan ketebalan lapisan permukaan harus direncanakan dengan cermat agar dapat menjaga daya tahan struktur secara keseluruhan.

Lapisan base dan subbase bertugas mendistribusikan beban dari permukaan ke tanah dasar (subgrade). Base harus cukup kaku untuk menahan tegangan tinggi akibat beban roda, sementara subbase berfungsi sebagai peralihan agar beban tidak langsung mengenai subgrade yang relatif lemah. Menurut Robinson dan Thagesen (2018), kegagalan pada salah satu lapisan akan berdampak sistemik pada struktur perkerasan. Sebagai contoh, apabila base tidak mampu menyalurkan beban secara merata, maka tegangan berlebih akan diteruskan ke subgrade sehingga mengakibatkan penurunan diferensial atau rutting pada permukaan. Dengan demikian, fungsi setiap lapisan tidak dapat dipandang terpisah, melainkan harus dipahami sebagai bagian integral dari sistem perkerasan.

Stabilitas subgrade sangat krusial dalam mendukung lapisan di atasnya. Subgrade yang lemah atau mengalami perubahan kelembaban berlebihan akan mempercepat kerusakan pada seluruh sistem perkerasan, bahkan jika lapisan permukaan dan base telah dirancang dengan baik. Drainase yang buruk misalnya, dapat mengakibatkan penumpukan air di subbase yang berujung pada retak-retak dini di lapisan permukaan. Oleh karena itu, desain struktur perkerasan harus bersifat holistik, mempertimbangkan interaksi antar lapisan, kondisi tanah dasar, serta faktor lingkungan. Pendekatan ini memungkinkan

terciptanya perkerasan jalan yang lebih tahan lama, ekonomis, dan berkelanjutan.

## D. Pentingnya Desain Perkerasan

Desain perkerasan merupakan salah satu tahap terpenting dalam rekayasa jalan raya karena menentukan kinerja, umur layanan, serta biaya pemeliharaan jalan selama masa pakainya. Perkerasan jalan yang dirancang secara baik dapat menjamin keselamatan pengguna jalan, menekan biaya pemeliharaan, serta mendukung mobilitas dan pertumbuhan ekonomi. Menurut Huang (2004), desain perkerasan adalah proses teknis untuk menentukan tebal lapisan perkerasan yang sesuai berdasarkan kondisi lalu lintas, daya dukung tanah dasar, bahan konstruksi, iklim, serta faktor lingkungan. Tanpa desain yang tepat, jalan rentan mengalami kerusakan prematur seperti retak, deformasi permanen, atau kerusakan struktural lainnya. Dalam konteks Indonesia, di mana variasi kondisi tanah dan iklim sangat luas, desain perkerasan menjadi faktor krusial untuk memastikan keandalan jaringan jalan nasional (Kementerian PUPR, 2020).

### 1. Tujuan Desain Perkerasan

Desain perkerasan memiliki beberapa tujuan strategis:

- a. Memastikan Kinerja Struktural: Desain yang tepat memastikan struktur perkerasan mampu menahan beban lalu lintas selama umur layanan tanpa mengalami kerusakan signifikan. Perkerasan yang dirancang berdasarkan analisis lalu lintas dan sifat mekanik tanah akan menghasilkan jalan yang kuat dan tahan lama.
- b. Mengoptimalkan Biaya: Desain perkerasan yang baik bukan hanya memperhitungkan biaya awal konstruksi, tetapi juga biaya pemeliharaan dan perbaikan selama umur jalan.
- c. Mendukung Keselamatan dan Kenyamanan: Permukaan jalan yang baik akan memberikan kenyamanan bagi pengendara dan mengurangi risiko kecelakaan. Desain perkerasan harus mempertimbangkan faktor seperti kekasaran permukaan, drainase, dan traksi jalan.
- d. Mendukung Keberlanjutan Lingkungan: Desain perkerasan modern mulai mempertimbangkan aspek keberlanjutan seperti

penggunaan material ramah lingkungan, pengelolaan air hujan, dan minimisasi emisi karbon selama konstruksi.

## 2. Faktor-faktor yang Mempengaruhi Desain Perkerasan

Beberapa faktor penting yang harus dipertimbangkan dalam desain perkerasan meliputi:

- a. Beban Lalu Lintas: Beban lalu lintas adalah faktor paling dominan dalam desain perkerasan. Data lalu lintas berupa volume kendaraan, jenis kendaraan, dan distribusi beban akan menentukan dimensi dan jenis perkerasan. Analisis lalu lintas harus dilakukan secara mendalam, termasuk proyeksi pertumbuhan lalu lintas, agar perkerasan mampu menahan beban selama umur rencana.
- b. Kondisi Tanah Dasar: Daya dukung tanah dasar mempengaruhi tebal lapisan perkerasan yang diperlukan. Tanah dengan CBR rendah memerlukan lapisan pondasi yang lebih tebal atau perlakuan stabilisasi khusus. Curah hujan tinggi dapat menurunkan daya dukung tanah dasar, sehingga desain perkerasan di wilayah tropis harus mempertimbangkan faktor drainase yang baik.
- c. Kondisi Iklim: Iklim berpengaruh pada sifat material perkerasan, terutama pada perkerasan lentur. Suhu tinggi dapat menyebabkan deformasi permanen (*rutting*), sementara suhu rendah dapat memicu retak termal (*thermal cracking*).
- d. Material Konstruksi: Jenis dan kualitas material konstruksi mempengaruhi kekuatan, fleksibilitas, dan umur perkerasan. Pemilihan material harus mempertimbangkan ketersediaan lokal, biaya, serta dampaknya terhadap lingkungan.
- e. Fungsi Jalan: Jalan dengan fungsi arteri primer memiliki persyaratan desain yang berbeda dibandingkan jalan lokal atau lingkungan. Jalan arteri primer membutuhkan desain perkerasan yang mampu menahan beban tinggi dan lalu lintas cepat.

## 3. Metode Desain Perkerasan

Pada praktik rekayasa jalan, terdapat beberapa metode desain perkerasan yang digunakan:

- a. Metode Empiris: Metode ini berdasarkan pengalaman sebelumnya dan data historis. Contoh klasik adalah metode

AASHTO (*American Association of State Highway and Transportation Officials*) yang telah digunakan sejak 1960-an (AASHTO, 2015).

- b. Metode *Mechanistic-Empirical* (M-E): Metode ini menggabungkan analisis mekanistik dan empiris untuk memperkirakan kinerja perkerasan secara lebih akurat (Haas et al., 2007). M-E menggunakan model numerik untuk menghitung distribusi tegangan, regangan, dan deformasi di bawah beban lalu lintas.
- c. Metode Stabilitas Struktur: Metode ini fokus pada kestabilan struktur perkerasan terhadap beban berulang. Contohnya adalah metode analisis lapisan elastis (*elastic layer theory*) yang digunakan untuk desain perkerasan kaku maupun lentur.

#### 4. Manfaat Desain Perkerasan yang Baik

Desain perkerasan yang tepat memberikan manfaat signifikan:

- a. Umur Layanan yang Lebih Panjang: Desain yang memperhitungkan faktor beban, iklim, dan material dapat meningkatkan umur layanan perkerasan hingga 20–30 tahun.
- b. Efisiensi Biaya Pemeliharaan: Desain optimal mengurangi kebutuhan rehabilitasi jalan dan menekan biaya pemeliharaan.
- c. Keamanan dan Kenyamanan Berkendara: Desain yang baik akan menghasilkan permukaan jalan yang rata, memiliki daya cengkram tinggi, dan meminimalkan deformasi sehingga meningkatkan keselamatan pengguna jalan.
- d. Dampak Lingkungan yang Lebih Rendah: Pemilihan material daur ulang dan teknik konstruksi ramah lingkungan dapat mengurangi dampak negatif terhadap lingkungan.

#### E. Tantangan dan Isu Terkini dalam Teknologi Perkerasan

Teknologi perkerasan jalan telah berkembang pesat dalam beberapa dekade terakhir, seiring dengan peningkatan kebutuhan transportasi dan tuntutan terhadap keberlanjutan infrastruktur. Namun, perkembangan ini juga menghadirkan berbagai tantangan dan isu baru yang perlu diatasi agar perkerasan jalan tetap optimal, aman, dan ramah lingkungan. Perkembangan teknologi perkerasan tidak hanya terkait dengan material dan desain, tetapi juga mencakup aspek digitalisasi,

manajemen siklus hidup jalan, dan adaptasi terhadap perubahan iklim. Jamshidi dan White (2019) menekankan bahwa isu keberlanjutan menjadi fokus utama di era modern, termasuk penggunaan material daur ulang dan pengurangan emisi karbon selama konstruksi. Di Indonesia, tantangan teknologi perkerasan semakin kompleks karena kondisi geografis yang beragam, perubahan iklim, keterbatasan anggaran, serta peningkatan volume lalu lintas yang signifikan.

## 1. Tantangan dalam Teknologi Perkerasan

### a. Kenaikan Volume dan Beban Lalu Lintas

Pertumbuhan lalu lintas yang pesat, khususnya di wilayah perkotaan dan jalur tol, menjadi tantangan utama dalam desain dan pemeliharaan perkerasan. Kenaikan beban lalu lintas yang signifikan menyebabkan keausan dini pada lapisan permukaan serta deformasi permanen pada lapisan bawah.

### b. Perubahan Iklim

Perubahan iklim menyebabkan peningkatan suhu, curah hujan, dan kejadian cuaca ekstrem, yang berdampak langsung pada performa perkerasan. Curah hujan tinggi dapat menurunkan daya dukung tanah dasar (*subgrade*), sehingga meningkatkan risiko kerusakan struktur perkerasan. Selain itu, suhu ekstrem memengaruhi sifat material perkerasan. Suhu tinggi menyebabkan deformasi permanen (*rutting*) pada perkerasan lentur, sedangkan suhu rendah dapat memicu retak termal (*thermal cracking*). Oleh karena itu, teknologi perkerasan modern harus mempertimbangkan faktor iklim, termasuk material tahan suhu dan desain drainase yang optimal.

### c. Pemeliharaan dan Rehabilitasi

Pemeliharaan dan rehabilitasi perkerasan jalan merupakan tantangan besar karena memerlukan biaya besar dan mempengaruhi mobilitas transportasi. Menurut Robinson dan Thagesen (2018), metode pemeliharaan tradisional sering bersifat reaktif, baru dilakukan setelah kerusakan terjadi. Teknologi perkerasan modern berfokus pada pendekatan *preventive maintenance*, termasuk penggunaan material yang lebih tahan lama dan sistem monitoring berbasis sensor untuk deteksi dini kerusakan. Tantangan utama adalah penerapan

teknologi ini pada skala nasional, terutama di daerah terpencil dengan keterbatasan sumber daya.

d. Keterbatasan Material dan Sumber Daya

Pemilihan material perkerasan yang berkualitas memerlukan ketersediaan sumber daya yang memadai. Namun, keterbatasan material lokal, fluktuasi harga bahan baku, serta keterbatasan teknologi produksi menjadi hambatan utama. Penggunaan material alternatif seperti *Reclaimed Asphalt Pavement* (RAP) menjadi solusi, namun masih menghadapi tantangan kualitas dan standar produksi (Arshad & Ahmed, 2017). Selain itu, implementasi teknologi stabilisasi tanah memerlukan keahlian teknis yang belum merata di seluruh wilayah.

e. Teknologi dan Digitalisasi Desain Perkerasan

Teknologi digital, termasuk *Building Information Modelling* (BIM), *Geographic Information Systems* (GIS), dan sensor pintar, semakin digunakan dalam desain dan pemeliharaan perkerasan. BIM dapat meningkatkan efisiensi desain, meminimalkan kesalahan konstruksi, serta memudahkan monitoring siklus hidup jalan. Namun, adopsi teknologi ini masih terbatas di Indonesia karena faktor biaya, keterbatasan SDM terlatih, dan infrastruktur teknologi yang belum merata. Hal ini menjadi tantangan signifikan dalam menerapkan teknologi perkerasan modern secara luas.

f. Standarisasi dan Regulasi

Kurangnya standarisasi nasional yang konsisten dalam teknologi perkerasan menjadi tantangan tersendiri. Studi Kementerian PUPR (2022) menunjukkan bahwa variasi standar desain dan material antar daerah menyebabkan inkonsistensi kualitas jalan. Regulasi yang adaptif terhadap perkembangan teknologi juga penting agar inovasi perkerasan dapat diterapkan secara efektif. Tantangan ini mencakup penyusunan regulasi yang mendukung penggunaan material baru, metode desain modern, serta keberlanjutan lingkungan.

## 2. Isu Terkini dalam Teknologi Perkerasan

a. Keberlanjutan dan Material Ramah Lingkungan

Isu keberlanjutan dalam teknologi perkerasan semakin mendapat perhatian seiring meningkatnya tuntutan pengurangan emisi

karbon dan pemanfaatan material ramah lingkungan. Salah satu inovasi utama adalah penggunaan *Reclaimed Asphalt Pavement* (RAP) dan *Warm Mix Asphalt* (WMA). RAP memungkinkan aspal lama yang telah terkelupas atau diganti dapat diproses ulang dan dimanfaatkan kembali, sehingga mengurangi kebutuhan material baru serta menekan biaya produksi. Sementara itu, WMA memungkinkan produksi aspal pada suhu lebih rendah dibandingkan *Hot Mix Asphalt* (HMA), sehingga dapat menurunkan konsumsi energi dan emisi gas rumah kaca (Jamshidi & White, 2019).

Meskipun potensinya besar, pemanfaatan material daur ulang masih menghadapi sejumlah tantangan. Variasi kualitas RAP, perbedaan sumber material, serta ketidakseragaman standar produksi menjadi kendala dalam memastikan konsistensi mutu perkerasan. Selain itu, masih diperlukan penelitian lebih lanjut mengenai ketahanan jangka panjang material daur ulang terhadap beban lalu lintas dan kondisi lingkungan ekstrem.

b. Teknologi Perkerasan Pintar (*Smart Pavement*)

Teknologi *smart pavement* berkembang sebagai solusi inovatif dalam meningkatkan efisiensi pengelolaan infrastruktur jalan. Konsep ini mengintegrasikan sensor pada lapisan perkerasan untuk memantau berbagai parameter penting, seperti deformasi, suhu, kelembaban, hingga volume dan beban lalu lintas secara real-time. Data yang dihasilkan dapat digunakan untuk mendeteksi potensi kerusakan sejak dini, sehingga perawatan dapat dilakukan secara preventif sebelum terjadi kerusakan yang lebih parah (Vizzari et al., 2021). Dengan demikian, *smart pavement* berperan penting dalam mendukung manajemen jalan modern yang lebih proaktif, efisien, dan berbasis data.

Meski menawarkan manfaat signifikan, penerapan *smart pavement* masih menghadapi sejumlah kendala. Biaya instalasi dan perawatan sensor relatif tinggi, terutama jika diterapkan pada jaringan jalan berskala nasional. Selain itu, tantangan utama terletak pada integrasi data sensor dengan sistem manajemen jalan, baik dari segi infrastruktur teknologi maupun regulasi pengelolaan data.

c. Perkerasan Berpori (*Permeable Pavement*)

Perkerasan berpori (*permeable pavement*) merupakan salah satu inovasi dalam teknologi jalan yang berfungsi tidak hanya sebagai sarana transportasi, tetapi juga sebagai infrastruktur ramah lingkungan. Dengan struktur berpori, air hujan dapat meresap ke dalam tanah sehingga mengurangi risiko genangan, banjir, dan limpasan permukaan. Selain itu, teknologi ini berperan dalam meningkatkan kualitas air dengan menyaring polutan sebelum masuk ke sistem air tanah atau saluran drainase (Zhu et al., 2021). Hal ini menjadikan perkerasan berpori sebagai bagian penting dari pendekatan green infrastructure yang mendukung pembangunan berkelanjutan di kawasan perkotaan.

Penerapan perkerasan berpori di Indonesia masih menghadapi sejumlah kendala. Biaya awal pembangunan relatif lebih tinggi dibandingkan perkerasan konvensional, serta memerlukan perawatan khusus untuk mencegah pori-pori tersumbat oleh sedimen atau sampah. Selain itu, ketiadaan regulasi teknis yang komprehensif membuat implementasi teknologi ini belum optimal pada proyek jalan nasional maupun daerah.

d. Adaptasi terhadap Perubahan Iklim

Adaptasi perkerasan terhadap perubahan iklim menjadi tantangan penting dalam pengembangan infrastruktur transportasi modern. Perubahan pola curah hujan, meningkatnya suhu ekstrem, serta intensitas kejadian cuaca ekstrem seperti banjir dan gelombang panas menuntut teknologi perkerasan yang lebih tangguh. Inovasi yang tengah dikembangkan meliputi material dengan ketahanan tinggi terhadap suhu tinggi, sistem drainase yang lebih efisien untuk mengatasi limpasan air, serta desain perkerasan yang memasukkan faktor proyeksi iklim jangka panjang (Gudipudi et al., 2017). Pendekatan ini bertujuan agar jalan tetap berfungsi optimal meskipun dalam kondisi lingkungan yang terus berubah.

Di Indonesia, isu ini semakin relevan mengingat wilayah tropis rentan terhadap curah hujan tinggi dan fluktuasi suhu. Perkerasan yang tidak adaptif dapat lebih cepat mengalami kerusakan, seperti retak termal atau deformasi plastis. Oleh karena itu, adaptasi perkerasan terhadap perubahan iklim harus menjadi bagian integral dari kebijakan pembangunan jalan. Integrasi hasil

penelitian iklim dengan standar desain perkerasan, penggunaan material inovatif, serta penerapan teknologi monitoring berbasis sensor akan menjadi kunci untuk meningkatkan daya tahan infrastruktur jalan menghadapi tantangan iklim di masa depan.

e. Efisiensi Biaya dan Siklus Hidup Jalan

Pendekatan *Life Cycle Cost Analysis* (LCCA) menjadi fokus penting dalam teknologi perkerasan modern karena memberikan perspektif menyeluruh terhadap biaya sepanjang masa pakai jalan. LCCA tidak hanya mempertimbangkan biaya awal konstruksi, tetapi juga biaya pemeliharaan, rehabilitasi, dan penghancuran perkerasan di akhir masa layanannya. Dengan metode ini, perencanaan perkerasan dapat dilakukan secara ekonomis dan berkelanjutan, sehingga hasilnya adalah desain yang optimal dari segi kinerja maupun biaya (Huang, 2004). Pendekatan ini membantu para perencana dan pengambil kebijakan untuk memilih material dan metode konstruksi yang memberikan nilai terbaik sepanjang siklus hidup jalan.

Di era modern, penerapan LCCA semakin relevan seiring meningkatnya tekanan anggaran dan tuntutan keberlanjutan. Dengan menggunakan LCCA, efisiensi biaya tidak hanya dilihat dari penghematan pada tahap konstruksi, tetapi juga pada pengurangan biaya pemeliharaan dan rehabilitasi di masa depan. Hal ini mendorong penggunaan material inovatif, teknologi konstruksi efisien, dan desain perkerasan yang tahan lama. Integrasi LCCA dalam perencanaan jalan menjamin investasi infrastruktur yang lebih efektif dan berkelanjutan, sehingga mendukung pengelolaan sumber daya yang lebih bijaksana dan peningkatan kinerja jaringan jalan nasional.



## **BAB II**

# **DASAR TEORI**

# **PERKERASAN JALAN**

---

Dasar teori perkerasan jalan merupakan fondasi penting dalam merancang struktur jalan yang aman, tahan lama, dan ekonomis. Perkerasan jalan berfungsi untuk mendistribusikan beban lalu lintas ke tanah dasar sehingga dapat mengurangi deformasi dan memperpanjang umur jalan. Pemahaman tentang konsep beban dan respons perkerasan, mekanika bahan, serta karakteristik lalu lintas menjadi kunci dalam proses desain. Bab ini memberikan kerangka konseptual yang menjelaskan bagaimana berbagai elemen struktur perkerasan bekerja secara mekanis untuk menahan beban kendaraan dan kondisi lingkungan.

Bab ini membahas teori fundamental yang meliputi konsep beban dan respons perkerasan, karakteristik lalu lintas seperti ESAL (*Equivalent Single Axle Load*) dan spektrum beban, serta teori mekanika bahan untuk memahami perilaku material perkerasan. Pembahasan juga mencakup teori lapisan sistem (*Layered Elastic System*), teori fatigue dan rutting, serta pengaruh lingkungan terhadap performa perkerasan. Dengan memahami dasar teori ini, perancangan perkerasan dapat dilakukan secara ilmiah dan tepat sesuai kondisi lapangan.

### **A. Konsep Beban dan Respon Perkerasan**

Konsep beban dan respon perkerasan adalah landasan utama dalam rekayasa jalan. Perkerasan jalan harus dirancang untuk menahan beban lalu lintas dalam jangka panjang sambil mempertahankan performa struktural dan keselamatan pengguna. Pemahaman mengenai interaksi antara beban lalu lintas, karakteristik material perkerasan, dan respon struktural adalah kunci dalam perancangan perkerasan yang

efektif (Gonçalves & Margarido, 2016). Respon perkerasan dipengaruhi oleh sifat mekanik material, kondisi lapisan tanah dasar (*subgrade*), distribusi beban, serta faktor lingkungan seperti suhu dan kelembaban.

## 1. Konsep Beban pada Perkerasan Jalan

### a. Beban Lalu Lintas

Beban lalu lintas merupakan faktor utama yang mempengaruhi desain perkerasan. Beban ini terdiri dari berbagai jenis kendaraan dengan distribusi beban yang berbeda. Beban tersebut bersifat dinamis, berubah-ubah sesuai jenis kendaraan, kecepatan, kondisi jalan, dan distribusi lalu lintas. Beban lalu lintas biasanya diukur dalam satuan *Equivalent Single Axle Load* (ESAL), yaitu beban sumbu tunggal ekuivalen yang digunakan sebagai ukuran standar dalam perencanaan perkerasan. Menurut AASHTO (2015), ESAL digunakan untuk mengestimasi kerusakan yang ditimbulkan oleh berbagai jenis kendaraan berdasarkan distribusi beban sumbunya.

### b. Karakteristik Beban

Beban yang bekerja pada perkerasan jalan dapat dikategorikan berdasarkan:

- 1) Jenis kendaraan: mobil pribadi, truk, bus, dan kendaraan berat lainnya.
- 2) Distribusi sumbu: beban yang diterima per sumbu kendaraan berbeda-beda, misalnya truk dengan dua sumbu membawa beban berbeda dibandingkan truk tiga sumbu.
- 3) Frekuensi beban: jumlah kendaraan yang melewati suatu ruas jalan dalam periode tertentu.

Karakteristik beban ini harus diperhitungkan dalam desain perkerasan karena beban berat yang tinggi dan sering dapat menyebabkan deformasi permanen dan kerusakan struktural yang lebih cepat (Haas et al., 2007).

### c. Beban Lingkungan

Perkerasan jalan juga menerima beban lingkungan seperti tekanan akibat curah hujan, perubahan suhu, dan siklus pembekuan-pencairan. Beban ini mempengaruhi sifat mekanik material perkerasan dan umur layanan jalan. Misalnya, suhu tinggi dapat mengurangi viskositas aspal sehingga meningkatkan deformasi permanen (*rutting*), sedangkan suhu rendah dapat

menyebabkan retak termal (*thermal cracking*) pada perkerasan lentur.

## 2. Konsep Respon Perkerasan

Respon perkerasan adalah reaksi struktur perkerasan terhadap beban yang bekerja padanya. Respon ini mencakup distribusi tegangan, regangan, dan deformasi pada berbagai lapisan perkerasan dan tanah dasar (*subgrade*) (Huang, 2004). Pemahaman respon perkerasan sangat penting untuk menentukan ketebalan lapisan perkerasan, pemilihan material, serta metode konstruksi yang tepat. Respon perkerasan biasanya dianalisis dalam bentuk:

- a. Tegangan (*stress*): gaya internal per satuan luas yang muncul akibat beban luar.
- b. Regangan (*strain*): perubahan bentuk atau deformasi relatif yang terjadi pada material perkerasan akibat tegangan.
- c. Deformasi permanen: perubahan bentuk yang tidak kembali ke kondisi semula setelah beban dihilangkan.

Dua jenis regangan penting dalam analisis perkerasan adalah:

- a. Regangan tarik (*tensile strain*) di bawah permukaan lapisan perkerasan, yang dapat menyebabkan retak.
- b. Regangan geser (*shear strain*) pada permukaan lapisan bawah, yang dapat menyebabkan deformasi permanen (*rutting*).

## 3. Distribusi Beban pada Perkerasan

Ketika kendaraan melintasi jalan, beban yang dihasilkan tidak hanya bekerja pada permukaan, tetapi juga diteruskan ke lapisan-lapisan bawah perkerasan hingga tanah dasar (*subgrade*). Proses distribusi beban ini sangat penting untuk memastikan daya tahan perkerasan dan mencegah kerusakan struktural. Faktor-faktor seperti sifat material perkerasan, ketebalan lapisan, serta kondisi tanah dasar menjadi penentu utama efisiensi distribusi beban. Oleh karena itu, perencanaan struktur perkerasan harus mempertimbangkan karakteristik ini secara komprehensif untuk mencapai performa optimal sepanjang masa pakainya.

Perkerasan jalan berperan sebagai sistem lapisan elastis (*layered elastic system*) yang mampu mendistribusikan beban kendaraan secara bertahap ke lapisan bawah. Lapisan permukaan bertugas menahan beban langsung sekaligus melindungi lapisan di bawahnya. Base dan subbase

berfungsi sebagai media distribusi beban, sehingga tegangan yang diteruskan ke tanah dasar dapat diminimalkan. Efisiensi distribusi ini sangat dipengaruhi oleh ketebalan lapisan dan modulus elastisitas material yang digunakan. Ketebalan lapisan yang memadai dan modulus elastisitas yang tinggi dapat meningkatkan kapasitas distribusi beban, sehingga memperpanjang umur perkerasan. Sebaliknya, jika lapisan terlalu tipis atau material memiliki modulus elastisitas rendah, tegangan yang diteruskan ke subgrade akan meningkat, yang dapat mempercepat terjadinya deformasi permanen seperti rutting atau retak.

## B. Karakteristik Lalu Lintas (ESAL, Spektrum Beban)

Karakteristik lalu lintas adalah salah satu aspek fundamental dalam perencanaan dan desain perkerasan jalan. Beban lalu lintas yang bekerja pada jalan bukan hanya berperan dalam menentukan ketebalan dan struktur perkerasan, tetapi juga menjadi dasar dalam menentukan umur layanan dan kebutuhan pemeliharaan jalan. Menurut AASHTO (2015), karakteristik lalu lintas dianalisis menggunakan konsep *Equivalent Single Axle Load* (ESAL) dan spektrum beban, yang menggabungkan faktor jumlah kendaraan, jenis kendaraan, distribusi beban sumbu, dan frekuensi lintasan kendaraan. Analisis ini membantu insinyur jalan memprediksi tingkat keausan jalan dalam jangka panjang. Di Indonesia, karakteristik lalu lintas memiliki tantangan tersendiri karena variasi kondisi jalan, beban kendaraan, dan kurangnya data lalu lintas yang akurat secara nasional. Hal ini menuntut pendekatan desain yang adaptif dan berbasis data empiris lokal.

### 1. Konsep *Equivalent Single Axle Load* (ESAL)

*Equivalent Single Axle Load* (ESAL) adalah suatu unit pengukuran standar yang digunakan untuk mengukur kerusakan jalan yang disebabkan oleh lalu lintas kendaraan. ESAL mengubah berbagai jenis beban sumbu menjadi beban ekuivalen satu sumbu tunggal dengan beban 80 kN (18.000 lbs). Konsep ini dikembangkan untuk memudahkan analisis beban lalu lintas yang kompleks, sehingga beban lalu lintas dapat diekspresikan dalam satu angka tunggal yang mewakili efek kerusakan pada perkerasan.

ESAL dihitung berdasarkan faktor beban sumbu (*Axle Load Factor*, ALF) yang menggambarkan pengaruh beban kendaraan terhadap kerusakan perkerasan. Rumus dasar ESAL adalah:

$$ESAL = N \times ALF$$

di mana:

- N = jumlah lintasan sumbu kendaraan
- ALF = faktor beban sumbu

Faktor beban sumbu dihitung dengan mempertimbangkan eksponen kerusakan yang berkisar antara 3 hingga 6, tergantung jenis perkerasan dan kondisi material.

Peran ESAL dalam desain perkerasan sangat krusial, terutama pada metode desain mekanistik-empiris. ESAL digunakan sebagai input utama untuk menentukan ketebalan lapisan perkerasan yang dibutuhkan agar mampu menahan beban lalu lintas selama umur rencana jalan. Perancangan yang mempertimbangkan ESAL memungkinkan estimasi umur layanan jalan menjadi lebih akurat. Contohnya, sebuah jalan dengan nilai ESAL tinggi akan membutuhkan lapisan permukaan dan lapisan penopang yang lebih tebal dibandingkan dengan jalan dengan nilai ESAL rendah. Hal ini bertujuan untuk mencegah kerusakan dini seperti retak atau deformasi plastis yang disebabkan oleh beban berulang.

ESAL juga membantu dalam pemilihan material perkerasan dan metode konstruksi. Jalan dengan ESAL tinggi memerlukan material dengan modulus elastisitas dan ketahanan yang lebih tinggi untuk menahan tekanan dan tegangan akibat lalu lintas berat. Oleh karena itu, penerapan konsep ESAL tidak hanya meningkatkan keandalan struktur perkerasan, tetapi juga memastikan efisiensi biaya dalam jangka panjang.

## 2. Spektrum Beban Lalu Lintas

Spektrum beban adalah distribusi beban lalu lintas yang terjadi pada suatu ruas jalan dalam periode tertentu. Spektrum ini meliputi jumlah kendaraan berdasarkan jenis, konfigurasi sumbu, dan beban aktual pada setiap lintasan sumbu. Spektrum beban digunakan untuk memodelkan karakteristik lalu lintas yang realistik, karena tidak semua

kendaraan memberikan beban yang sama pada perkerasan. Huang (2004) menekankan bahwa spektrum beban menjadi dasar untuk analisis kerusakan yang lebih komprehensif. Spektrum beban meliputi:

- a. Distribusi Jenis Kendaraan – proporsi kendaraan ringan, sedang, dan berat yang melewati ruas jalan.
- b. Distribusi Beban Sumbu – variasi beban pada setiap sumbu kendaraaan.
- c. Frekuensi Lintasan – jumlah lintasan sumbu kendaraan per hari atau per tahun.

Spektrum beban harus dihitung berdasarkan data lalu lintas nyata untuk menghasilkan desain perkerasan yang akurat (Robinson & Thagesen, 2018).

Metode analisis spektrum beban umumnya menggunakan data survei lalu lintas jangka panjang yang dikumpulkan melalui sistem pemantauan seperti *Weigh-in-Motion* (WIM). WIM memungkinkan pengukuran berat kendaraan secara real-time tanpa menghentikan lalu lintas, sehingga menghasilkan data yang akurat dan representatif. Data ini mencakup informasi tentang jenis kendaraan, konfigurasi poros, serta frekuensi lintasan. Data lalu lintas ini kemudian dianalisis untuk membentuk spektrum beban yang akan digunakan dalam perhitungan ESAL. Penggunaan model statistik dan perangkat lunak analisis lalu lintas mempermudah transformasi spektrum beban menjadi data ESAL yang praktis untuk desain perkerasan, meningkatkan keakuratan dan efisiensi perencanaan jalan.

Analisis spektrum beban memiliki implikasi langsung pada desain perkerasan jalan. Dengan memahami spektrum beban secara menyeluruh, perancang dapat menentukan ketebalan lapisan yang sesuai dan memilih material perkerasan yang mampu menahan beban lalu lintas spesifik pada lokasi tersebut. Selain itu, data spektrum beban juga mendukung evaluasi kinerja jalan dan pemeliharaan preventif yang lebih efektif.

### **3. Karakteristik Lalu Lintas di Indonesia**

- a. Kondisi Lalu Lintas

Karakteristik lalu lintas di Indonesia menunjukkan variasi yang signifikan tergantung pada jenis dan fungsi jalan. Jalan tol, sebagai jaringan utama untuk transportasi jarak jauh, umumnya memiliki beban lalu lintas yang tinggi namun relatif stabil karena

dirancang untuk kapasitas tertentu dan dilengkapi dengan sistem manajemen lalu lintas yang baik. Kondisi ini memungkinkan prediksi beban lalu lintas menjadi lebih akurat, sehingga perencanaan perkerasan dapat dilakukan dengan basis data yang lebih andal (Kementerian PUPR, 2022).

Jalan non-tol seperti jalan nasional, provinsi, dan kabupaten/kota memiliki karakteristik lalu lintas yang lebih kompleks. Beban lalu lintas di jalan ini sering kali sangat bervariasi, baik dari segi volume maupun jenis kendaraan. Tidak jarang jalan non-tol dilalui kendaraan berat melebihi kapasitas rencana, yang dapat mempercepat kerusakan perkerasan. Faktor ini menuntut desain perkerasan yang lebih adaptif serta strategi pemeliharaan yang responsif terhadap kondisi lalu lintas yang dinamis dan beragam di Indonesia.

b. Overloading Kendaraan

Overloading kendaraan menjadi salah satu isu utama dalam karakteristik lalu lintas di Indonesia. Fenomena ini terjadi ketika kendaraan berat melintasi jalan melebihi batas beban sumbu yang ditetapkan, sehingga memberikan tekanan berlebih pada struktur perkerasan. Overloading tidak hanya umum terjadi pada kendaraan angkutan barang, tetapi juga berdampak signifikan pada percepatan kerusakan jalan. Beban berlebih ini menyebabkan deformasi permanen seperti rutting, retak, dan kerusakan struktural lainnya yang mengurangi umur layanan jalan secara signifikan.

Dampak overloading tidak hanya terbatas pada kerusakan fisik perkerasan, tetapi juga meningkatkan nilai *Equivalent Single Axle Load* (ESAL) secara signifikan. Peningkatan ESAL berarti lapisan perkerasan harus mampu menahan beban yang jauh lebih besar dari rancangan awal, sehingga desain perkerasan jalan harus mempertimbangkan faktor overloading dalam spektrum beban lalu lintas.

c. Distribusi Beban Musiman

Distribusi beban musiman merupakan salah satu aspek penting dalam karakteristik lalu lintas di Indonesia. Faktor-faktor seperti musim panen, libur nasional, dan periode mudik memengaruhi volume dan jenis kendaraan yang melintasi jalan. Pada periode tersebut, terjadi lonjakan signifikan dalam lalu lintas, termasuk

peningkatan jumlah kendaraan berat seperti truk angkutan hasil panen atau kendaraan pribadi dalam jumlah besar. Kondisi ini menyebabkan perubahan distribusi beban yang berdampak pada tingkat keausan dan umur layanan perkerasan jalan.

Fenomena musiman ini menjadi tantangan dalam perencanaan dan desain perkerasan. Analisis spektrum beban lalu lintas harus memasukkan faktor variasi musiman untuk memastikan bahwa perkerasan mampu menahan beban puncak tersebut tanpa mengalami kerusakan prematur. Mengabaikan distribusi beban musiman dapat menyebabkan desain yang kurang optimal, sehingga mempercepat terjadinya deformasi dan menambah biaya pemeliharaan.

## C. Teori Mekanika Bahan untuk Perkerasan

Teori mekanika bahan adalah landasan fundamental dalam analisis perkerasan jalan. Teori ini menjelaskan bagaimana material perkerasan merespon beban lalu lintas melalui distribusi tegangan, regangan, dan deformasi. Pemahaman konsep mekanika bahan sangat penting dalam merancang perkerasan yang aman, efisien, dan tahan lama (Huang, 2004). Mekanika bahan memberikan kerangka ilmiah untuk memahami perilaku material perkerasan seperti aspal, beton, dan lapisan pondasi di bawah beban.

### 1. Dasar Teori Mekanika Bahan

#### a. Tegangan dan Regangan

Konsep dasar mekanika bahan adalah tegangan (*stress*) dan regangan (*strain*).

- 1) Tegangan didefinisikan sebagai gaya per satuan luas yang diterima material.
- 2) Regangan adalah perubahan relatif bentuk atau ukuran material akibat tegangan.

Persamaan dasar hubungan tegangan-regangan diberikan oleh Hukum Hooke:

$$\sigma = E \cdot \varepsilon$$

di mana:

- $\sigma$  = tegangan
- $E$  = modulus elastisitas
- $\varepsilon$  = regangan

Hukum Hooke berlaku pada daerah elastis material, namun material perkerasan seperti aspal dan beton menunjukkan perilaku non-linear, sehingga memerlukan model mekanika bahan yang lebih kompleks.

b. Modulus Elastisitas dan Modulus Poisson

- 1) Modulus elastisitas ( $E$ ) adalah ukuran kekakuan material. Material dengan modulus elastisitas tinggi memiliki kemampuan menahan deformasi lebih baik.
- 2) Modulus Poisson ( $\nu$ ) adalah rasio regangan lateral terhadap regangan aksial, menggambarkan sifat deformasi material. Material perkerasan memiliki nilai modulus elastisitas dan modulus Poisson yang berbeda, tergantung jenis material, temperatur, dan kondisi kelembaban.

## 2. Mekanika Bahan pada Perkerasan Lentur dan Kaku

a. Perkerasan Lentur (*Flexible Pavement*)

Perkerasan lentur terdiri dari lapisan permukaan aspal yang menyebarkan beban lalu lintas ke lapisan bawah (base dan subbase) dan tanah dasar (subgrade). Prinsip kerja perkerasan lentur adalah distribusi tegangan secara bertahap sehingga tanah dasar tidak menerima tegangan berlebih yang dapat menyebabkan deformasi permanen. Respon perkerasan lentur dipengaruhi oleh modulus elastisitas lapisan aspal, ketebalan lapisan, dan sifat lapisan pondasi. Tegangan dan regangan di bawah lapisan permukaan aspal dapat dihitung menggunakan metode analisis lapisan elastis (*multi-layer elastic theory*).

b. Perkerasan Kaku (*Rigid Pavement*)

Perkerasan kaku menggunakan beton sebagai lapisan permukaan. Beton memiliki modulus elastisitas tinggi, sehingga beban lalu lintas didistribusikan lebih luas ke tanah dasar. Perkerasan kaku cenderung menahan deformasi permanen, namun rentan terhadap retak termal dan retak akibat perbedaan temperatur. Analisis

mekanika bahan untuk perkerasan kaku melibatkan studi tegangan tarik di bawah permukaan beton dan perancangan sambungan beton (*contraction joints*).

### 3. Model Mekanika Bahan dalam Perkerasan Jalan

#### a. Model Lapisan Elastis (*Elastic Layer Model*)

Model lapisan elastis adalah pendekatan klasik dalam analisis perkerasan. Model ini menganggap setiap lapisan perkerasan bersifat elastis homogen, sehingga tegangan dan regangan dapat dihitung secara matematis. Analisis lapisan elastis membantu menentukan ketebalan lapisan perkerasan yang diperlukan untuk menahan beban lalu lintas tanpa menyebabkan kerusakan signifikan.

#### b. Model Mekanistik-Empiris (*Mechanistic-Empirical Model*)

Model mekanistik-empiris menggabungkan analisis mekanika bahan dengan data empiris performa perkerasan. Model ini digunakan dalam desain perkerasan modern seperti AASHTO MEPDG (*Mechanistic-Empirical Pavement Design Guide*) (AASHTO, 2015). Model M-E memungkinkan prediksi yang lebih akurat terhadap umur layanan perkerasan dengan mempertimbangkan tegangan, regangan, kondisi iklim, dan karakteristik lalu lintas.

#### c. Model Non-linear dan Viscoelastic

Material perkerasan seperti aspal menunjukkan sifat viskoelastis, di mana respon tegangan-regangan bergantung pada waktu dan temperatur. Model viskoelastis digunakan untuk memprediksi deformasi permanen (*rutting*) dan retak termal (*thermal cracking*) pada perkerasan lentur. Analisis viskoelastis memerlukan data eksperimen seperti modulus dinamis dan fungsi relaksasi material aspal.

### 4. Faktor yang Mempengaruhi Respon Mekanika Bahan pada Perkerasan

- Karakteristik Material: Sifat mekanik material perkerasan, seperti modulus elastisitas, modulus Poisson, dan kekuatan tekan, sangat mempengaruhi respon struktur perkerasan. Material berkualitas tinggi dapat mengurangi ketebalan lapisan perkerasan dan memperpanjang umur layanan jalan.

- b. Kondisi Tanah Dasar (Subgrade): Tanah dasar berperan penting dalam distribusi beban. Tanah dengan daya dukung rendah menyebabkan deformasi lebih besar pada lapisan perkerasan. Teknik stabilisasi tanah, seperti penambahan kapur atau semen, digunakan untuk meningkatkan modulus elastisitas tanah dasar.
- c. Kondisi Lingkungan: Temperatur dan kelembaban mempengaruhi sifat mekanik material perkerasan. Aspal lebih lentur pada suhu tinggi tetapi rentan terhadap deformasi permanen, sedangkan beton lebih rentan terhadap retak pada suhu rendah.
- d. Distribusi Beban Lalu Lintas: Beban lalu lintas yang tinggi meningkatkan tegangan dan regangan pada lapisan perkerasan. Distribusi beban sumbu yang tidak merata dapat menyebabkan kerusakan lokal seperti retak, lubang, dan deformasi permanen (*rutting*).

## 5. Analisis Tegangan dan Regangan dalam Perkerasan Jalan

- a. Tegangan Vertikal dan Regangan Aksial

Analisis tegangan dan regangan menjadi bagian penting dalam memahami perilaku struktur perkerasan jalan. Tegangan vertikal pada permukaan perkerasan merupakan akibat langsung dari beban kendaraan yang melintas. Besarnya tegangan ini bergantung pada berat kendaraan, distribusi beban, serta karakteristik material perkerasan. Tegangan vertikal ini kemudian diteruskan ke lapisan-lapisan bawah perkerasan, memengaruhi kinerja dan daya tahan jalan secara keseluruhan. Sebagai respons terhadap tegangan vertikal, perkerasan mengalami regangan aksial, yaitu deformasi dalam arah horizontal akibat tekanan yang diterima. Regangan ini menjadi indikator penting dalam menentukan umur layanan perkerasan karena berhubungan langsung dengan munculnya kerusakan seperti retak pada perkerasan lentur atau distorsi pada perkerasan kaku.

- b. Regangan Tarik dan Geser

Regangan tarik dan geser merupakan parameter penting dalam analisis perilaku struktur perkerasan jalan. Regangan tarik biasanya terjadi pada permukaan bawah lapisan aspal akibat beban berulang dari kendaraan. Fenomena ini berisiko

menyebabkan retak termal (*bottom-up cracking*), terutama pada perkerasan lentur, yang dapat mengurangi umur layanan jalan secara signifikan. Oleh karena itu, regangan tarik menjadi salah satu faktor utama yang harus diperhitungkan dalam desain perkerasan untuk memastikan ketahanan terhadap kerusakan jangka panjang.

Regangan geser terjadi pada lapisan pondasi (base dan subbase) akibat geseran antar butiran material ketika beban kendaraan diteruskan ke bawah. Regangan geser ini berkontribusi terhadap deformasi permanen (*rutting*), yang dapat mengurangi kenyamanan berkendara dan mempercepat kerusakan jalan. Analisis regangan geser membantu menentukan ketebalan lapisan perkerasan dan kualitas material pondasi yang sesuai. Dengan memperhitungkan kedua bentuk regangan ini secara seksama, desain perkerasan dapat dioptimalkan untuk meningkatkan kinerja jalan, memperpanjang umur layanan, dan mengurangi biaya pemeliharaan sepanjang siklus hidupnya.

c. Analisis dengan Metode Lapisan Elastis

Analisis dengan metode lapisan elastis merupakan pendekatan penting dalam perancangan perkerasan jalan. Metode ini memodelkan struktur perkerasan sebagai sistem berlapis-lapis yang masing-masing bersifat elastis dan homogen, sehingga beban lalu lintas dapat dianalisis secara sistematis. Dengan pendekatan ini, tegangan dan regangan pada setiap lapisan dapat dihitung secara akurat, termasuk tegangan vertikal, regangan tarik, dan regangan geser yang berpengaruh terhadap kinerja perkerasan (Gonçalves & Margarido, 2016).

Keunggulan metode lapisan elastis adalah kemampuannya untuk memberikan estimasi perilaku perkerasan yang realistik terhadap beban berulang dan kondisi lapangan yang kompleks. Analisis ini membantu menentukan ketebalan optimal lapisan perkerasan dan karakteristik material yang sesuai untuk memenuhi umur layanan yang diharapkan.

## 6. Implikasi Teori Mekanika Bahan dalam Desain Perkerasan

a. Penentuan Ketebalan Lapisan Perkerasan

Pemahaman mekanika bahan memiliki peran penting dalam penentuan ketebalan lapisan perkerasan jalan. Prinsip-prinsip

mekanika bahan digunakan untuk menganalisis respons material perkerasan terhadap beban lalu lintas, termasuk tegangan, regangan, dan deformasi yang terjadi. Dengan pemodelan yang tepat, perancang dapat menentukan ketebalan lapisan permukaan, base, dan subbase yang optimal sehingga struktur perkerasan mampu menahan beban kendaraan berulang tanpa mengalami kerusakan dini seperti retak atau deformasi plastis. Penentuan ketebalan lapisan perkerasan yang didasarkan pada teori mekanika bahan juga mempertimbangkan karakteristik material seperti modulus elastisitas, koefisien Poisson, dan daya dukung tanah dasar. Dengan demikian, desain yang dihasilkan tidak hanya aman dan efisien secara struktural, tetapi juga ekonomis karena menghindari penggunaan material berlebih yang tidak diperlukan. Pendekatan ini memastikan umur layanan perkerasan dapat tercapai sesuai dengan perencanaan, sekaligus meminimalkan biaya pemeliharaan sepanjang siklus hidup jalan.

b. Pemilihan Material Perkerasan

Pemilihan material perkerasan merupakan aspek krusial dalam desain struktur jalan yang didasarkan pada teori mekanika bahan. Material perkerasan harus memiliki sifat mekanik yang sesuai untuk menahan beban lalu lintas sepanjang umur layanan jalan. Parameter penting seperti modulus elastisitas, daya dukung, koefisien Poisson, serta ketahanan terhadap deformasi dan retak menjadi dasar dalam pemilihan material. Material yang tepat akan meningkatkan efisiensi distribusi tegangan dan regangan pada lapisan perkerasan sehingga meminimalkan risiko kerusakan dini.

Kemampuan material beradaptasi terhadap kondisi lingkungan juga menjadi pertimbangan penting. Faktor seperti perubahan suhu, kelembaban, siklus pembekuan-pencairan, serta dampak bahan kimia harus diperhitungkan. Pemilihan material yang tepat, seperti aspal termodifikasi, agregat berkualitas tinggi, atau material inovatif seperti geosintetik, dapat meningkatkan ketahanan perkerasan terhadap kondisi ekstrem.

c. Strategi Pemeliharaan

Strategi pemeliharaan yang efektif dalam perkerasan jalan sangat bergantung pada pemahaman mekanika bahan. Analisis mekanika bahan memungkinkan identifikasi jenis kerusakan

yang mungkin terjadi akibat beban lalu lintas dan kondisi lingkungan, serta menentukan bagaimana tegangan dan regangan memengaruhi umur layanan perkerasan. Informasi ini penting untuk merencanakan pemeliharaan yang tepat waktu dan efisien, sehingga mencegah kerusakan yang lebih parah dan mengurangi biaya perbaikan jangka panjang.

Analisis mekanika bahan membantu menentukan metode rehabilitasi yang sesuai berdasarkan kondisi material dan tingkat kerusakan perkerasan. Misalnya, retak permukaan akibat regangan tarik mungkin memerlukan overlay dengan material khusus, sementara deformasi permanen akibat regangan geser pada lapisan pondasi dapat memerlukan perbaikan struktural yang lebih mendalam. Dengan strategi pemeliharaan yang berbasis analisis mekanika bahan, efektivitas perawatan jalan meningkat, umur layanan diperpanjang, dan biaya pemeliharaan dapat diminimalkan secara signifikan.

## D. Teori Lapisan Sistem (*Layered Elastic System*)

Teori Lapisan Sistem atau *Layered Elastic System* adalah konsep fundamental dalam mekanika perkerasan jalan yang digunakan untuk memodelkan struktur perkerasan sebagai susunan lapisan elastis yang saling berinteraksi. Pendekatan ini digunakan secara luas dalam analisis mekanistik perkerasan untuk menentukan distribusi tegangan (*stress*), regangan (*strain*), dan deformasi di bawah beban lalu lintas (Gonçalves & Margarido, 2016). Teori ini mengasumsikan bahwa setiap lapisan perkerasan memiliki sifat elastis homogen dan isotropik, dan terikat secara penuh (*fully bonded*) atau sebagian terikat pada lapisan di bawahnya. Analisis *Layered Elastic System* membantu insinyur jalan untuk merancang ketebalan lapisan, memilih material, dan menentukan kebutuhan pemeliharaan jalan.

### 1. Konsep Dasar Teori Lapisan Sistem

*Layered Elastic System* adalah pendekatan analitis yang memandang struktur perkerasan sebagai kombinasi dari beberapa lapisan elastis yang memiliki modulus elastisitas (*E*) dan Poisson's ratio (*v*) tertentu. Lapisan-lapisan ini menanggung beban lalu lintas dan

mendistribusikannya secara bertahap ke lapisan di bawahnya hingga tanah dasar (*subgrade*). Teori ini didasarkan pada beberapa asumsi:

- a. Lapisan perkerasan adalah elastis, homogen, isotropik.
- b. Lapisan-lapisan berinteraksi secara penuh atau sebagian (*bonded or unbonded layers*).
- c. Beban lalu lintas didistribusikan secara merata di permukaan lapisan atas.
- d. Tanah dasar bersifat elastis semi-infinite.

Asumsi ini meskipun idealisasi, telah terbukti cukup akurat untuk memprediksi performa perkerasan dalam banyak kasus nyata, terutama ketika data sifat material lapisan tersedia (Robinson & Thagesen, 2018).

## 2. Struktur Perkerasan dalam Teori Lapisan Sistem

Struktur perkerasan biasanya terdiri dari beberapa lapisan dengan fungsi yang berbeda:

- a. Lapisan Permukaan (*Surface Course*)  
Lapisan ini langsung menerima beban lalu lintas. Pada perkerasan lentur, lapisan permukaan menggunakan aspal (*Hot Mix Asphalt* – HMA), sedangkan pada perkerasan kaku menggunakan beton portland. Fungsi utama lapisan permukaan adalah menahan beban langsung, memberikan permukaan yang halus, serta melindungi lapisan di bawahnya dari pengaruh cuaca dan kelembaban.
- b. Lapisan Pondasi (*Base Course*)  
Lapisan pondasi berfungsi mendistribusikan beban dari lapisan permukaan ke lapisan subbase dan tanah dasar. Lapisan ini harus memiliki modulus elastisitas yang cukup tinggi untuk mengurangi tegangan dan regangan pada lapisan di bawahnya.
- c. Lapisan Subbase (*Subbase Course*)  
Lapisan subbase memberikan dukungan tambahan terhadap lapisan pondasi dan membantu memperbaiki drainase perkerasan. Pada lapisan ini biasanya digunakan material granular atau hasil daur ulang (*recycled materials*) untuk meningkatkan kekakuan struktural.
- d. Tanah Dasar (*Subgrade*)  
Tanah dasar adalah lapisan paling bawah yang menopang seluruh struktur perkerasan. Kondisi tanah dasar sangat menentukan

performa perkerasan, sehingga sifat mekaniknya harus dianalisis secara cermat menggunakan metode *Layered Elastic System*.

### 3. Analisis Lapisan Elastis pada Perkerasan Jalan

#### a. Prinsip Dasar Analisis

Analisis lapisan elastis merupakan pendekatan fundamental dalam perancangan perkerasan jalan. Prinsip dasar dari analisis ini adalah menghitung distribusi tegangan dan regangan pada setiap lapisan perkerasan ketika menerima beban lalu lintas. Informasi tersebut digunakan untuk menentukan ketebalan lapisan yang optimal dan memprediksi umur layanan jalan. Dengan memahami perilaku lapisan perkerasan di bawah beban, perancang dapat memastikan struktur jalan memiliki kekuatan dan daya tahan yang memadai untuk menahan kondisi lalu lintas sepanjang siklus hidupnya.

Analisis lapisan elastis dilakukan dengan memecahkan persamaan elastisitas pada sistem lapisan melalui metode numerik seperti Boussinesq's Theory, Burmister's Method, dan Finite Element Method. Metode-metode ini memungkinkan perhitungan tegangan, regangan, dan deformasi pada tiap lapisan perkerasan dengan tingkat akurasi tinggi. Hasil analisis ini menjadi dasar penting bagi pemilihan ketebalan lapisan dan material, sehingga desain perkerasan dapat dioptimalkan untuk memberikan performa struktural yang maksimal serta efisiensi biaya yang berkelanjutan.

#### b. Metode Boussinesq

Metode Boussinesq adalah salah satu pendekatan klasik dalam analisis lapisan elastis pada perkerasan jalan. Metode ini digunakan untuk menghitung distribusi tegangan vertikal pada lapisan elastis semi-infinite akibat beban yang bekerja pada permukaan. Perhitungan dilakukan berdasarkan teori elastisitas, dengan asumsi material bersifat homogen, isotropik, dan tak terbatas pada kedalaman. Metode ini memberikan gambaran awal tentang bagaimana tegangan merambat ke lapisan bawah perkerasan akibat beban lalu lintas, sehingga berguna dalam analisis dasar ketahanan struktur jalan.

Keterbatasan metode Boussinesq perlu diperhatikan. Metode ini hanya berlaku untuk satu lapisan elastis, sehingga tidak memperhitungkan interaksi antara lapisan-lapisan yang

membentuk struktur perkerasan jalan. Padahal, pada kenyataannya perkerasan terdiri dari beberapa lapisan dengan sifat material yang berbeda, seperti permukaan, base, subbase, dan tanah dasar.

c. Metode Burmister

Metode Burmister adalah pengembangan penting dalam analisis lapisan elastis yang memungkinkan evaluasi sistem perkerasan multi-lapisan secara lebih realistik. Berbeda dengan metode Boussinesq yang hanya berlaku untuk satu lapisan elastis, teori Burmister memperhitungkan interaksi antar lapisan yang memiliki sifat material berbeda, seperti modulus elastisitas dan ketebalan yang bervariasi. Dengan pendekatan ini, distribusi tegangan, regangan, dan deformasi pada setiap lapisan perkerasan dapat dianalisis secara lebih akurat sesuai kondisi lapangan.

Metode Burmister menjadi dasar dari banyak perangkat lunak analisis perkerasan modern seperti KENPAVE dan ELSYMS5, yang digunakan secara luas dalam desain dan evaluasi ketahanan perkerasan jalan. Perangkat lunak ini memanfaatkan algoritma Burmister untuk melakukan simulasi beban lalu lintas pada struktur perkerasan multilapis, sehingga mempermudah perhitungan ketebalan lapisan dan pemilihan material.

d. *Finite Element Method* (FEM)

*Finite Element Method* (FEM) merupakan metode numerik yang paling fleksibel dan canggih untuk analisis lapisan elastis pada perkerasan jalan. FEM memungkinkan pemodelan struktur perkerasan dengan konfigurasi lapisan yang kompleks, termasuk variasi ketebalan, sifat material yang berbeda, dan kondisi batas yang realistik. Dengan kemampuan ini, FEM dapat memberikan analisis yang lebih akurat dibandingkan metode klasik seperti Boussinesq atau Burmister, terutama untuk kondisi lapangan yang kompleks dan beragam.

FEM sangat efektif dalam menangani sifat material non-linear, seperti perilaku viskoelastis aspal yang berubah terhadap suhu dan laju beban. Metode ini memungkinkan simulasi respons perkerasan terhadap berbagai kondisi lalu lintas dan lingkungan secara detail, sehingga mendukung perancangan struktur jalan yang lebih optimal dan tahan lama. Kelebihan FEM

menjadikannya alat penting dalam penelitian dan aplikasi rekayasa perkerasan modern, terutama ketika diperlukan presisi tinggi dalam analisis tegangan, regangan, dan deformasi lapisan perkerasan.

#### 4. Parameter Penting dalam Analisis Lapisan Elastis

- a. Modulus Elastisitas Lapisan: Modulus elastisitas lapisan ( $E$ ) adalah parameter utama yang mempengaruhi distribusi tegangan dan regangan dalam perkerasan. Lapisan dengan modulus elastisitas tinggi akan mampu mendistribusikan beban lebih efektif ke lapisan bawah.
- b. Modulus Poisson: Modulus Poisson ( $\nu$ ) menentukan hubungan regangan lateral dan aksial pada material. Nilai  $\nu$  yang berbeda pada setiap lapisan mempengaruhi pola distribusi tegangan.
- c. Ketebalan Lapisan: Ketebalan lapisan mempengaruhi besar tegangan dan regangan pada lapisan di bawahnya. Ketebalan lapisan yang optimal akan mengurangi tegangan di lapisan bawah sehingga mengurangi risiko kerusakan dini.
- d. Kondisi Ikatan Lapisan: Kondisi ikatan antar lapisan (*bonded*, *unbonded*, atau *partially bonded*) mempengaruhi distribusi tegangan. Analisis lapisan elastis harus mempertimbangkan kondisi ini untuk memprediksi respon struktur perkerasan dengan tepat.

#### 5. Penerapan Teori Lapisan Sistem dalam Desain Perkerasan

- a. Desain Perkerasan Lentur

Desain perkerasan lentur sangat bergantung pada penerapan teori lapisan sistem untuk memastikan struktur jalan mampu menahan beban lalu lintas secara optimal. Analisis lapisan elastis digunakan untuk menghitung distribusi tegangan dan regangan pada setiap lapisan perkerasan, khususnya regangan tarik pada permukaan bawah lapisan permukaan dan regangan geser pada lapisan pondasi. Regangan tarik ini berkaitan langsung dengan retak pada lapisan permukaan (*bottom-up cracking*), sedangkan regangan geser berhubungan dengan deformasi permanen pada lapisan pondasi.

Nilai regangan tersebut menjadi kriteria utama dalam desain perkerasan lentur. Ketebalan lapisan perkerasan ditentukan

sedemikian rupa sehingga regangan tarik dan geser berada di bawah ambang batas yang dapat menyebabkan kerusakan dini. Dengan demikian, penerapan teori lapisan sistem tidak hanya membantu merancang struktur yang aman dan tahan lama, tetapi juga meningkatkan efisiensi material dan mengoptimalkan biaya konstruksi serta pemeliharaan jalan.

b. Desain Perkerasan Kaku

Desain perkerasan kaku memanfaatkan penerapan teori lapisan sistem untuk memastikan struktur beton memiliki kekuatan dan ketahanan yang optimal terhadap beban lalu lintas. Analisis lapisan elastis digunakan untuk menghitung distribusi tegangan di bawah plat beton, yang sangat penting untuk memahami bagaimana beban lalu lintas diteruskan ke lapisan bawah. Selain itu, perhitungan tegangan tarik pada permukaan bawah beton menjadi kriteria penting, karena tegangan tarik yang berlebihan dapat menyebabkan retak pada beton (Robinson & Thagesen, 2018).

Hasil analisis tersebut menjadi dasar dalam menentukan ketebalan beton yang cukup untuk menahan beban kendaraan sepanjang umur layanan jalan. Selain itu, perhitungan ini juga berperan dalam desain sambungan, seperti jarak dan tipe sendi, yang berfungsi mengontrol retak dan deformasi akibat ekspansi termal dan beban lalu lintas.

c. Desain Mekanistik-Empiris

Desain mekanistik-empiris (*Mechanistic-Empirical Pavement Design*) merupakan pendekatan modern dalam perancangan perkerasan jalan yang mengintegrasikan prinsip-prinsip teori lapisan elastis dengan data empiris hasil pengamatan lapangan. Teori lapisan elastis digunakan untuk menghitung respons struktural perkerasan terhadap beban lalu lintas, seperti distribusi tegangan dan regangan, sementara pendekatan empiris mengaitkan hasil analisis tersebut dengan kinerja perkerasan berdasarkan pengalaman dan data historis. Pendekatan ini memungkinkan desain yang lebih akurat dan tahan lama dibandingkan metode tradisional.

Menurut AASHTO (2015), desain mekanistik-empiris menjadi dasar dari standar perkerasan modern seperti AASHTO MEPDG (*Mechanistic-Empirical Pavement Design Guide*). Metode ini

memungkinkan penyesuaian desain berdasarkan karakteristik lalu lintas, kondisi material, dan faktor lingkungan, sehingga menghasilkan struktur perkerasan yang optimal baik dari sisi kekuatan maupun biaya.

## E. Teori Fatigue dan Rutting

Kerusakan pada perkerasan jalan umumnya dipengaruhi oleh dua mekanisme utama: *fatigue cracking* (retak kelelahan) dan *rutting* (deformasi permanen). Kedua fenomena ini menjadi perhatian penting dalam desain perkerasan jalan modern, karena berpengaruh langsung terhadap umur layanan dan keselamatan jalan (Huang, 2004).

### 1. Teori Fatigue pada Perkerasan Jalan

Fatigue pada perkerasan adalah proses kerusakan akibat tegangan dan regangan siklik yang berulang-ulang di bawah beban kendaraan. Meskipun setiap siklus beban tidak menghasilkan kerusakan langsung, akumulasi beban siklik menyebabkan retak kelelahan pada lapisan permukaan. Retak fatigue biasanya muncul pada lapisan permukaan atau permukaan bawah lapisan permukaan dan berkembang secara progresif hingga menyebabkan kerusakan struktural (*bottom-up cracking* atau *top-down cracking*) (Mejłun et al., 2017).

Faktor utama yang mempengaruhi fatigue meliputi:

- Jumlah siklus beban lalu lintas (N).
- Besarnya regangan pada permukaan bawah lapisan aspal (*bottom-up strain*).
- Ketahanan material terhadap retak (*fatigue life*).
- Kondisi lingkungan seperti suhu dan kelembaban.

Model fatigue perkerasan biasanya menggunakan pendekatan mekanistik-empiris, di mana hubungan antara jumlah siklus beban dan regangan dinyatakan dalam bentuk persamaan empiris seperti:

$$N_f = k \cdot \left( \frac{1}{\varepsilon_t} \right)^m$$

di mana:

- $N_f$  = jumlah siklus beban sebelum retak terjadi
- $\varepsilon_t$  = regangan tarik pada permukaan bawah lapisan permukaan

- $k, m$  = konstanta material yang ditentukan dari pengujian laboratorium.

Persamaan fatigue ini menjadi komponen kunci dalam metode desain mekanistik-empiris seperti AASHTO MEPDG.

Teori fatigue pada perkerasan jalan membahas mekanisme kegagalan struktural akibat beban lalu lintas berulang yang menyebabkan kerusakan dalam jangka panjang. Pada perkerasan lentur, fatigue cracking umumnya terjadi ketika regangan tarik berulang pada permukaan bawah lapisan aspal mencapai atau melampaui batas kelelahan material. Regangan ini biasanya paling besar di bawah tepi roda kendaraan, sehingga area tersebut rentan terhadap retak bottom-up yang berkembang dari bawah permukaan ke arah atas. Kerusakan ini menjadi salah satu indikator utama berkurangnya umur layanan perkerasan lentur.

Pada perkerasan kaku, *fatigue cracking* tidak sebesar pada perkerasan lentur, tetapi tetap dapat terjadi. Penyebab utamanya adalah tegangan tarik yang muncul pada sambungan beton atau pada daerah permukaan yang mengalami konsentrasi tegangan akibat beban lalu lintas dan perubahan suhu. Tegangan tarik ini dapat menyebabkan retak yang dikenal sebagai *joint cracking*, yang jika tidak ditangani dapat berkembang dan mempercepat kerusakan struktur perkerasan.

Pemahaman terhadap mekanisme fatigue sangat penting dalam perancangan perkerasan karena memungkinkan perencanaan struktur yang mampu menahan beban lalu lintas berulang tanpa mengalami kerusakan prematur. Oleh karena itu, analisis fatigue menggunakan teori mekanika bahan dan data lalu lintas menjadi salah satu elemen utama dalam desain modern, termasuk metode mekanistik-empiris, yang memastikan ketahanan perkerasan terhadap retak fatigue sepanjang umur layanan jalan.

## 2. Teori Rutting pada Perkerasan Jalan

Rutting adalah deformasi permanen berupa alur memanjang pada jalur lalu lintas yang disebabkan oleh deformasi lapisan perkerasan di bawah beban lalu lintas yang berulang. Rutting dapat terjadi pada lapisan permukaan maupun pada lapisan pondasi. Rutting dapat dikategorikan menjadi dua mekanisme:

- a. Permukaan rutting (*surface rutting*), yaitu deformasi pada lapisan permukaan akibat perpindahan material aspal.
- b. Struktural rutting (*structural rutting*), yaitu deformasi permanen pada lapisan pondasi atau subgrade.

Beberapa faktor yang mempengaruhi rutting antara lain:

- a. Beban lalu lintas – jumlah dan distribusi beban kendaraan.
- b. Karakteristik material – modulus elastisitas, stabilitas, dan ketahanan terhadap deformasi permanen.
- c. Ketebalan lapisan perkerasan – lapisan yang terlalu tipis rentan mengalami rutting.
- d. Kondisi tanah dasar – tanah dasar dengan daya dukung rendah akan meningkatkan risiko rutting.
- e. Kondisi lingkungan – temperatur tinggi mempercepat deformasi pada lapisan aspal.

Analisis rutting memerlukan perhitungan regangan geser pada lapisan permukaan atau lapisan pondasi. Model umum yang digunakan adalah:

$$RD = k \cdot \varepsilon_s^n$$

di mana:

- RD = kedalaman rutting
- $\varepsilon_s^n$  = regangan geser pada lapisan tertentu
- k, n = konstanta material.

Model ini membantu merancang ketebalan lapisan perkerasan dan memilih material yang memiliki ketahanan deformasi tinggi.

Teori rutting pada perkerasan jalan menjelaskan mekanisme deformasi permanen berupa alur atau cekungan yang terbentuk di jalur roda kendaraan akibat pengaruh beban lalu lintas berulang. Rutting biasanya terjadi pada perkerasan lentur, tetapi juga dapat muncul pada perkerasan kaku dalam kondisi tertentu. Mekanisme ini dipengaruhi oleh sifat material perkerasan, kualitas konstruksi, kondisi lalu lintas, dan faktor lingkungan seperti suhu. Rutting menjadi salah satu indikator penting berkurangnya kualitas permukaan jalan dan dapat memengaruhi kenyamanan serta keselamatan pengguna jalan.

Salah satu penyebab utama rutting adalah perpindahan permanen butiran agregat pada lapisan permukaan akibat siklus beban lalu lintas.

Saat beban dilewatkan berulang kali, agregat dalam lapisan permukaan cenderung mengalami pergeseran sehingga menimbulkan deformasi. Faktor kualitas campuran aspal, ukuran butiran, dan kepadatan lapisan permukaan sangat berpengaruh terhadap tingkat rutting yang terjadi.

Kompaksi berulang pada lapisan pondasi dan subgrade akibat beban lalu lintas juga dapat menyebabkan deformasi permanen. Pada kondisi suhu tinggi, pelelehan material aspal juga menjadi faktor penting yang mempercepat proses rutting karena mengurangi kekakuan lapisan permukaan. Oleh karena itu, analisis rutting menjadi bagian penting dalam desain perkerasan modern, termasuk penerapan metode mekanistik-empiris, guna memastikan struktur jalan memiliki daya dukung optimal dan umur layanan yang panjang.

### **3. Hubungan Fatigue dan Rutting dalam Desain Perkerasan**

Hubungan fatigue dan rutting dalam desain perkerasan menekankan bahwa kedua mekanisme kerusakan ini saling berkaitan dan harus dianalisis secara bersamaan untuk menghasilkan struktur jalan yang optimal dan tahan lama. Fatigue cracking dan rutting bukanlah fenomena terpisah, melainkan dua bentuk kerusakan yang sering terjadi bersamaan pada kondisi lalu lintas nyata. Fatigue terjadi akibat regangan tarik berulang di bawah lapisan permukaan, sedangkan rutting merupakan deformasi permanen yang terjadi akibat regangan geser pada lapisan permukaan atau pondasi. Pemahaman simultan terhadap keduanya menjadi kunci dalam merancang perkerasan yang mampu menahan beban lalu lintas jangka panjang.

Menurut AASHTO (2015), metode desain modern seperti mekanistik-empiris (MEPDG) mengintegrasikan analisis fatigue dan rutting sebagai dasar perhitungan ketebalan lapisan perkerasan. Analisis fatigue digunakan untuk menentukan batas regangan tarik bawah lapisan permukaan, sedangkan analisis rutting berfokus pada evaluasi regangan geser pada lapisan pondasi dan permukaan. Kedua analisis ini kemudian digabungkan dalam model desain untuk memastikan perkerasan memiliki ketahanan optimal terhadap retak dan deformasi permanen.

Pendekatan ini memungkinkan perancangan yang lebih realistik karena mempertimbangkan kondisi lalu lintas, material, serta faktor lingkungan secara menyeluruh. Dengan demikian, desain perkerasan yang mempertimbangkan fatigue dan rutting tidak hanya meningkatkan umur layanan jalan, tetapi juga mengoptimalkan efisiensi biaya

pemeliharaan. Pendekatan ini menjadi standar penting dalam perencanaan perkerasan modern untuk menghasilkan jalan yang lebih andal, aman, dan berkelanjutan.

#### **4. Pendekatan Desain untuk Mengurangi Fatigue dan Rutting**

##### **a. Pemilihan Material**

Pemilihan material merupakan salah satu pendekatan kunci dalam desain perkerasan untuk mengurangi risiko fatigue dan rutting. Material dengan modulus elastisitas tinggi mampu menahan regangan tarik berulang pada lapisan permukaan, sehingga mengurangi kemungkinan terjadinya fatigue cracking. Selain itu, material yang memiliki stabilitas termal yang baik dapat mempertahankan performa perkerasan meskipun mengalami fluktuasi suhu, sehingga menurunkan risiko deformasi permanen akibat rutting.

Penggunaan modifikasi polimer atau bahan daur ulang pada campuran aspal menjadi strategi efektif untuk meningkatkan ketahanan perkerasan. Modifikasi polimer dapat meningkatkan elastisitas dan stabilitas termal aspal, sedangkan bahan daur ulang seperti *Reclaimed Asphalt Pavement* (RAP) tidak hanya memberikan manfaat lingkungan tetapi juga dapat meningkatkan daya dukung perkerasan jika diproses dengan benar (Jamshidi & White, 2019). Pendekatan material ini menjadi salah satu langkah penting dalam desain modern yang mengutamakan ketahanan, efisiensi biaya, dan keberlanjutan.

##### **b. Ketebalan Lapisan Perkerasan**

Penentuan ketebalan lapisan perkerasan adalah elemen krusial dalam desain untuk mengurangi fatigue dan rutting. Ketebalan yang optimal mampu menyalurkan dan mendistribusikan beban lalu lintas secara efisien, sehingga mengurangi regangan tarik pada permukaan bawah lapisan permukaan yang menjadi penyebab utama fatigue cracking. Dengan demikian, perkerasan dapat mempertahankan integritas strukturalnya dalam jangka panjang (Huang, 2004).

Ketebalan lapisan yang tepat juga berperan penting dalam mengurangi regangan geser pada lapisan pondasi, yang merupakan faktor utama penyebab rutting. Analisis mekanistik-empiris modern menggunakan data ESAL, karakteristik material,

dan kondisi lingkungan untuk menentukan ketebalan lapisan optimal. Pendekatan ini tidak hanya meningkatkan daya tahan jalan tetapi juga meminimalkan biaya pemeliharaan sepanjang siklus hidup jalan, sehingga menghasilkan desain perkerasan yang lebih efisien dan berkelanjutan.

c. Perbaikan Tanah Dasar

Perbaikan tanah dasar merupakan langkah penting dalam desain perkerasan untuk mengurangi risiko fatigue dan rutting. Tanah dasar yang memiliki daya dukung rendah akan menyebabkan konsentrasi tegangan yang tinggi pada lapisan perkerasan, sehingga mempercepat terjadinya kerusakan. Dengan melakukan stabilisasi tanah dasar menggunakan bahan seperti kapur, semen, atau bahan stabilisasi lainnya, modulus elastisitas tanah dasar dapat ditingkatkan. Hal ini akan membantu mendistribusikan beban lalu lintas secara lebih merata dan mengurangi deformasi permanen pada lapisan perkerasan (Atmanegara, 2017).

Stabilisasi juga dapat memperbaiki sifat fisik dan mekanik tanah seperti kepadatan, daya dukung, dan resistensi terhadap kelembaban. Proses ini memungkinkan perkerasan menahan beban lalu lintas yang lebih besar dan memperpanjang umur layanan jalan. Oleh karena itu, perbaikan tanah dasar merupakan strategi efektif yang harus dipertimbangkan dalam perencanaan dan desain perkerasan modern untuk menghasilkan struktur jalan yang tahan lama dan efisien secara biaya.

d. Perawatan Preventif

Perawatan preventif merupakan strategi penting dalam mengurangi risiko fatigue dan rutting pada perkerasan jalan. Tindakan seperti sealing retak (*crack sealing*) berfungsi untuk mencegah masuknya air ke dalam lapisan perkerasan, yang dapat melemahkan struktur dan mempercepat kerusakan akibat fatigue. Dengan menutup retakan pada tahap awal, perkerasan dapat mempertahankan integritas strukturalnya lebih lama, sehingga memperpanjang umur layanan jalan.

Overlay atau penambahan lapisan permukaan baru juga menjadi pendekatan efektif untuk memperbaiki kondisi perkerasan yang mulai mengalami keausan. Overlay tidak hanya meningkatkan ketebalan lapisan, tetapi juga memperbaiki tekstur permukaan dan daya dukung jalan. Dengan demikian, kombinasi perawatan

preventif ini dapat mengurangi frekuensi rehabilitasi besar, menekan biaya pemeliharaan, dan meningkatkan keselamatan pengguna jalan. Pendekatan ini menjadi bagian integral dari manajemen siklus hidup perkerasan yang berkelanjutan.

## F. Pengaruh Lingkungan terhadap Perkerasan

Perkerasan jalan merupakan sistem struktur yang berinteraksi secara kompleks dengan beban lalu lintas dan kondisi lingkungan. Faktor lingkungan seperti iklim, suhu, kelembaban, curah hujan, dan kondisi drainase memiliki dampak signifikan terhadap kinerja perkerasan jalan. Pengaruh ini dapat mempengaruhi umur layanan, mekanisme kerusakan, biaya pemeliharaan, dan keselamatan lalu lintas (Atmanegara, 2017). Desain perkerasan yang tidak mempertimbangkan kondisi lingkungan berpotensi menghasilkan kerusakan dini seperti retak kelelahan (*fatigue cracking*), deformasi permanen (*rutting*), hingga kegagalan struktural lapisan pondasi.

### 1. Faktor Lingkungan yang Mempengaruhi Perkerasan

#### a. Suhu

Suhu mempengaruhi sifat mekanik material perkerasan, terutama pada perkerasan lentur yang menggunakan aspal.

- 1) Pengaruh suhu tinggi: Pada suhu tinggi, sifat viskoelastis aspal menyebabkan penurunan modulus elastisitas (E), sehingga meningkatkan deformasi plastis dan risiko rutting. Deformasi ini terjadi karena pelelahan material aspal dan penurunan stabilitas struktural lapisan permukaan.
- 2) Pengaruh suhu rendah: Pada suhu rendah, modulus elastisitas aspal meningkat sehingga material menjadi lebih kaku dan rapuh. Kondisi ini meningkatkan risiko retak permukaan akibat fatigue cracking dan thermal cracking.

#### b. Kelembaban dan Curah Hujan

Kelembaban dan curah hujan berpengaruh pada kondisi drainase perkerasan dan tanah dasar (*subgrade*).

- 1) Pengaruh kelembaban: Penurunan modulus tanah dasar akibat kelembaban yang tinggi meningkatkan risiko deformasi permanen (*structural rutting*). Kelembaban berlebih juga dapat mengurangi kekuatan ikatan antar butiran

- agregat pada lapisan pondasi, menyebabkan penurunan stabilitas perkerasan.
- 2) Pengaruh curah hujan: Curah hujan tinggi meningkatkan risiko erosi lapisan permukaan dan subbase, serta memicu kegagalan drainase. Drainase yang buruk menyebabkan genangan air (*pumping*) pada lapisan perkerasan, yang mempercepat proses fatigue cracking dan rutting.
  - c. Siklus Pembekuan dan Pencairan (*Freeze-Thaw Cycles*)  
Fenomena pembekuan dan pencairan sangat mempengaruhi kinerja perkerasan, terutama di daerah beriklim dingin. Siklus ini menyebabkan perubahan volume tanah dasar akibat ekspansi es, yang memicu retak permukaan dan deformasi permanen. Efek freeze-thaw menyebabkan perubahan modulus tanah dasar secara signifikan, sehingga perlu diperhitungkan dalam analisis lapisan elastis perkerasan (Gudipudi et al., 2017).
  - d. Paparan Sinar UV dan Oksidasi  
Paparan sinar ultraviolet (UV) dan oksidasi menyebabkan degradasi material aspal pada lapisan permukaan. Proses ini meningkatkan kekakuan aspal pada permukaan, sehingga rentan terhadap retak thermal dan fatigue cracking.

## 2. Analisis Pengaruh Lingkungan pada Desain Perkerasan

- a. Metode Mekanistik-Empiris  
Pendekatan mekanistik-empiris, seperti yang digunakan dalam AASHTO MEPDG (*Mechanistic-Empirical Pavement Design Guide*), memberikan peran penting pada faktor lingkungan dalam perancangan perkerasan jalan. Faktor lingkungan seperti suhu, kelembaban, curah hujan, dan siklus pembekuan-pencairan mempengaruhi sifat material perkerasan dan perilaku struktur jalan secara keseluruhan. Dengan memasukkan variabel lingkungan ke dalam model fatigue dan rutting, perancangan perkerasan dapat dilakukan dengan mempertimbangkan kondisi nyata di lapangan, sehingga prediksi umur layanan menjadi lebih akurat (AASHTO, 2015). Integrasi faktor lingkungan dalam desain juga memungkinkan penyesuaian strategi material dan ketebalan lapisan perkerasan untuk menghadapi kondisi ekstrem. Misalnya, daerah dengan suhu tinggi memerlukan material aspal yang tahan deformasi plastis, sedangkan daerah dengan siklus

pembekuan-pencairan membutuhkan desain yang memperhatikan regangan tarik dan drainase.

b. Penggunaan Data Klimatologi

Penggunaan data klimatologi merupakan aspek krusial dalam desain perkerasan modern, karena kondisi lingkungan sangat mempengaruhi kinerja dan umur layanan jalan. Data seperti profil temperatur, curah hujan, kelembaban, dan siklus pembekuan-pencairan memberikan informasi yang diperlukan untuk menilai perubahan sifat material perkerasan selama masa layanan. Misalnya, temperatur tinggi dapat menyebabkan pelelahan material aspal, sedangkan siklus pembekuan-pencairan dapat mempercepat retak dan deformasi pada perkerasan kaku. Dengan memanfaatkan data klimatologi secara tepat, perancang jalan dapat menyesuaikan pemilihan material, ketebalan lapisan, dan metode konstruksi agar sesuai dengan kondisi lingkungan setempat. Pendekatan ini meningkatkan akurasi prediksi umur layanan jalan serta efisiensi biaya pemeliharaan.

c. Analisis Hidrologi

Analisis hidrologi berperanan penting dalam desain perkerasan jalan karena drainase yang baik sangat menentukan daya tahan dan performa jalan. Kelembaban berlebih pada lapisan pondasi dapat menurunkan modulus elastisitas tanah dasar, mempercepat deformasi, dan meningkatkan risiko kerusakan seperti rutting dan retak. Oleh karena itu, analisis hidrologi digunakan untuk memahami pola aliran air, volume curah hujan, dan kondisi drainase di lokasi proyek (Robinson & Thagesen, 2018). Dengan hasil analisis hidrologi, perancang dapat menentukan sistem drainase yang optimal, baik berupa drainase permukaan maupun drainase dalam, untuk menjaga kestabilan lapisan perkerasan. Desain drainase yang tepat akan memperpanjang umur layanan jalan, mengurangi biaya pemeliharaan, dan meningkatkan keselamatan pengguna jalan. Pendekatan ini menjadikan analisis hidrologi sebagai komponen integral dalam proses perancangan perkerasan yang adaptif terhadap kondisi lingkungan.



# BAB III

## JENIS PERKERASAN

### JALAN

---

Jenis perkerasan jalan merupakan aspek penting dalam perencanaan dan konstruksi jalan yang memengaruhi kinerja, biaya, dan umur layanan jalan. Pemilihan jenis perkerasan harus mempertimbangkan kondisi lalu lintas, karakteristik tanah dasar, ketersediaan material, anggaran proyek, serta tujuan penggunaan jalan. Dalam praktiknya, perkerasan jalan dibagi menjadi beberapa jenis utama yang memiliki keunggulan dan keterbatasan masing-masing. Pemahaman tentang jenis perkerasan menjadi landasan bagi perancangan yang optimal dan berkelanjutan.

Bab ini membahas secara komprehensif berbagai jenis perkerasan, meliputi perkerasan lentur (*flexible pavement*), perkerasan kaku (*rigid pavement*), dan perkerasan komposit. Setiap jenis perkerasan memiliki karakteristik mekanis dan desain struktur yang berbeda. Selain itu, bab ini membahas perbandingan kinerja dan biaya dari setiap sistem perkerasan untuk membantu menentukan pilihan yang paling sesuai. Pembahasan ini juga menekankan bahwa pemilihan jenis perkerasan harus didukung oleh analisis teknis yang matang, termasuk evaluasi terhadap kondisi lalu lintas, lingkungan, dan faktor ekonomi.

#### A. Perkerasan Lentur (*Flexible Pavement*)

Perkerasan lentur (*flexible pavement*) merupakan jenis perkerasan jalan yang paling umum digunakan di seluruh dunia, terutama pada jalan dengan lalu lintas yang beragam dan kondisi iklim tropis maupun subtropis. Struktur perkerasan lentur terdiri dari beberapa lapisan material agregat yang disatukan dengan aspal atau bahan pengikat lain yang bersifat fleksibel. Sistem ini memungkinkan

perkerasan untuk menahan beban lalu lintas dengan mendistribusikan tekanan ke lapisan bawah secara bertahap.

Keunggulan utama perkerasan lentur adalah kemampuannya untuk menyesuaikan diri terhadap pergerakan tanah dasar, sehingga lebih tahan terhadap perubahan beban dan kondisi lingkungan dibandingkan perkerasan kaku (*rigid pavement*). Namun, perkerasan lentur juga memiliki kelemahan, seperti rentan terhadap deformasi plastis (*rutting*) dan retak kelelahan (*fatigue cracking*) akibat beban berulang (Gonçalves & Margarido, 2016).

## 1. Struktur Perkerasan Lentur

Perkerasan lentur tersusun atas beberapa lapisan dengan fungsi khusus, yang bekerja bersama untuk mendukung beban lalu lintas:

- a. Lapisan Permukaan (*Surface Course*): Lapisan paling atas yang berfungsi sebagai kontak langsung dengan lalu lintas. Lapisan ini harus memiliki ketahanan terhadap keausan, deformasi, dan retak thermal. Material yang umum digunakan adalah campuran aspal panas (*hot mix asphalt* – HMA) atau campuran aspal dingin (*cold mix asphalt*). Fungsi utama lapisan permukaan:
  - 1) Menyediakan permukaan yang aman dan nyaman untuk lalu lintas.
  - 2) Menahan beban langsung dari kendaraan.
  - 3) Menahan pengaruh lingkungan seperti sinar UV, curah hujan, dan temperatur ekstrem.
- b. Lapisan Pondasi Atas (*Base Course*): Lapisan di bawah lapisan permukaan yang berfungsi mendistribusikan beban ke lapisan pondasi bawah. Base course biasanya terdiri dari material granular atau beton aspal. Fungsi:
  - 1) Mendistribusikan beban secara merata ke lapisan pondasi bawah.
  - 2) Memberikan stabilitas struktural pada perkerasan.
  - 3) Menyediakan drainase awal untuk lapisan permukaan.
- c. Lapisan Pondasi Bawah (*Subbase Course*): Berada di bawah base course dan berfungsi sebagai lapisan tambahan untuk mendistribusikan beban serta meningkatkan drainase. Lapisan ini umumnya terdiri dari material granular berkualitas rendah dibanding base course.

- d. Tanah Dasar (Subgrade): Lapisan paling bawah yang berupa tanah alami atau tanah yang telah distabilisasi. Subgrade berfungsi sebagai fondasi perkerasan jalan dan harus memiliki daya dukung yang memadai.

## 2. Karakteristik Perkerasan Lentur

Perkerasan lentur memiliki karakteristik mekanis yang membedakannya dari jenis perkerasan lain:

- a. Distribusi Beban: Beban yang diterima perkerasan lentur didistribusikan secara bertahap ke lapisan di bawahnya. Tegangan permukaan yang tinggi akan mereda saat beban diteruskan ke lapisan yang lebih rendah.
- b. Kemampuan Adaptasi terhadap Pergerakan Tanah Dasar: Karena sifat materialnya yang fleksibel, perkerasan lentur dapat menyesuaikan bentuknya terhadap deformasi tanah dasar tanpa mengalami kerusakan signifikan.
- c. Sensitivitas terhadap Beban Berulang dan Lingkungan: Perkerasan lentur sangat rentan terhadap fatigue cracking akibat beban lalu lintas berulang dan rutting akibat beban berat. Kondisi lingkungan seperti suhu, kelembaban, dan curah hujan juga memengaruhi kinerjanya.

## 3. Desain Perkerasan Lentur

- a. Metode Desain Konvensional

Metode desain konvensional, seperti AASHTO 1993, tetap menjadi salah satu pendekatan utama dalam perancangan perkerasan lentur karena kesederhananya dan penerimaan luas di dunia teknik jalan. Metode ini menggunakan konsep Structural Number (SN) sebagai indikator kebutuhan ketebalan lapisan perkerasan, yang dihitung berdasarkan beban lalu lintas (dinyatakan dalam ESAL), kondisi tanah dasar, dan faktor lingkungan seperti kelembaban dan temperatur. SN menjadi parameter kunci untuk memastikan bahwa perkerasan memiliki kekuatan dan daya tahan yang sesuai dengan kondisi operasi jalan.

Kelebihan metode AASHTO 1993 adalah kemampuannya memberikan panduan desain yang relatif cepat dan sederhana tanpa memerlukan analisis mekanistik yang kompleks. Namun,

metode ini memiliki keterbatasan dalam mengakomodasi variasi kondisi lalu lintas dan lingkungan secara detail. Oleh karena itu, meskipun efektif, metode konvensional sering dilengkapi atau digantikan oleh pendekatan mekanistik-empiris untuk menghasilkan desain perkerasan lentur yang lebih akurat dan adaptif terhadap kondisi nyata lapangan.

b. Metode Mekanistik-Empiris

Pendekatan modern menggunakan desain mekanistik-empiris seperti AASHTO MEPDG yang mempertimbangkan:

- 1) Karakteristik material.
- 2) Beban lalu lintas (ESAL).
- 3) Kondisi iklim dan lingkungan.
- 4) Sifat tanah dasar.

Metode ini menghasilkan desain yang lebih akurat dan tahan lama dibanding metode konvensional.

c. Faktor Desain Perkerasan Lentur

Faktor yang perlu diperhatikan dalam desain perkerasan lentur meliputi:

- 1) Lalu lintas dan distribusi beban kendaraan.
- 2) Ketahanan material terhadap fatigue dan rutting.
- 3) Kondisi tanah dasar (subgrade).
- 4) Faktor iklim dan lingkungan.
- 5) Ketebalan lapisan perkerasan.

#### 4. Material Perkerasan Lentur

Material perkerasan lentur berperan besar dalam kinerja perkerasan jalan. Material utama meliputi:

- a. Aspal (Bitumen): Aspal berfungsi sebagai bahan pengikat dalam campuran perkerasan lentur. Aspal memiliki sifat viskoelastis yang memungkinkan deformasi plastis pada suhu tinggi dan elastis pada suhu rendah.
- b. Agregat: Agregat memberikan kekakuan dan kekuatan pada lapisan perkerasan lentur. Sifat agregat seperti ukuran, bentuk, dan kekuatan mempengaruhi kinerja lapisan permukaan dan pondasi.
- c. Bahan Modifikasi: Penambahan bahan modifikasi seperti polimer, karet daur ulang, atau bahan organik dapat

meningkatkan ketahanan perkerasan lentur terhadap fatigue cracking, rutting, dan oksidasi.

## 5. Kelebihan dan Kekurangan Perkerasan Lentur

### a. Kelebihan

- 1) Fleksibel terhadap pergerakan tanah dasar.
- 2) Mudah diperbaiki dan dipelihara.
- 3) Biaya konstruksi awal relatif lebih rendah dibanding perkerasan kaku.

### b. Kekurangan

- 1) Rentan terhadap fatigue cracking dan rutting.
- 2) Umur layanan lebih pendek dibanding perkerasan kaku pada lalu lintas tinggi.
- 3) Memerlukan pemeliharaan lebih sering.

## 6. Inovasi dalam Perkerasan Lentur

### a. Aspal Termodifikasi Polimer

Aspal termodifikasi polimer (*Polymer Modified Asphalt/PMA*) merupakan inovasi penting dalam teknologi perkerasan lentur karena mampu meningkatkan sifat viskoelastis material. Penambahan polimer ke dalam campuran aspal meningkatkan elastisitas, stabilitas termal, dan ketahanan terhadap deformasi permanen seperti rutting. Selain itu, PMA juga memperbaiki ketahanan terhadap retak akibat kelelahan (*fatigue cracking*), sehingga memperpanjang umur layanan perkerasan (Jamshidi & White, 2019). Penggunaan PMA menjadi solusi strategis untuk menghadapi tantangan lalu lintas berat dan kondisi lingkungan ekstrem. Meskipun biaya produksi PMA relatif lebih tinggi dibandingkan aspal konvensional, manfaat jangka panjang berupa pengurangan frekuensi pemeliharaan dan peningkatan performa jalan membuatnya menjadi pilihan ekonomis dalam siklus hidup perkerasan.

### b. Teknologi *Warm Mix Asphalt* (WMA)

Teknologi *Warm Mix Asphalt* (WMA) merupakan inovasi penting dalam industri perkerasan lentur karena memungkinkan pencampuran dan pemanasan aspal pada temperatur yang lebih rendah dibandingkan metode konvensional. Pengurangan temperatur ini menghasilkan keuntungan signifikan dalam

efisiensi energi serta pengurangan emisi gas rumah kaca selama proses produksi dan konstruksi. Selain itu, WMA memberikan peluang penghematan biaya operasional dan mendukung keberlanjutan lingkungan.

WMA juga memiliki manfaat teknis. Pemrosesan pada suhu rendah membantu mempertahankan sifat viskoelastis aspal dan mengurangi oksidasi, sehingga meningkatkan umur layanan perkerasan. Teknologi ini juga memungkinkan waktu kerja yang lebih lama karena campuran tetap lebih mudah diolah sebelum memadat. Tantangan penerapan WMA meliputi kebutuhan adaptasi peralatan dan standar produksi, namun potensi efisiensi biaya dan manfaat lingkungan membuat WMA semakin populer di banyak proyek jalan modern.

c. *Recycled Asphalt Pavement (RAP)*

*Recycled Asphalt Pavement (RAP)* adalah material daur ulang yang diperoleh dari perkerasan lama yang dihancurkan dan diolah kembali menjadi campuran aspal baru. Penggunaan RAP dalam konstruksi perkerasan lentur menawarkan keuntungan signifikan, termasuk pengurangan kebutuhan bahan baku baru dan biaya konstruksi yang lebih rendah (Vizzari et al., 2021). Selain itu, penggunaan RAP membantu mengurangi volume limbah konstruksi yang dibuang ke tempat pembuangan akhir, sehingga memberikan dampak positif terhadap lingkungan.

Secara teknis, RAP dapat digunakan dalam berbagai proporsi campuran aspal tanpa mengurangi kinerja perkerasan jika dilakukan pengolahan dan kontrol kualitas yang tepat. Integrasi RAP juga mendukung prinsip pembangunan berkelanjutan dengan mengurangi konsumsi energi dan emisi karbon. Meskipun demikian, tantangan utama penggunaan RAP meliputi variasi kualitas material dan kebutuhan peralatan khusus untuk pengolahan ulang. Dengan inovasi teknologi, RAP menjadi solusi penting dalam meningkatkan efisiensi biaya dan keberlanjutan pada industri perkerasan jalan.

d. *Smart Pavement*

*Smart Pavement* adalah inovasi teknologi perkerasan yang mengintegrasikan sensor ke dalam lapisan permukaan jalan untuk memantau kondisi secara real-time. Sensor ini mampu mendeteksi berbagai parameter penting seperti beban lalu lintas,

deformasi, suhu, kelembaban, dan kondisi iklim. Informasi yang dikumpulkan kemudian dikirim ke sistem manajemen jalan sehingga memungkinkan pemeliharaan preventif yang lebih tepat waktu dan efisien. Teknologi ini menjanjikan peningkatan keselamatan, pengurangan biaya pemeliharaan, dan peningkatan umur layanan perkerasan.

*Smart Pavement* mendukung konsep transportasi pintar (*smart transportation*) yang berintegrasi dengan sistem IoT dan data besar (*big data*). Namun, tantangan utamanya meliputi biaya awal yang tinggi, kebutuhan perawatan sensor, dan integrasi data ke dalam sistem manajemen jalan nasional. Meski demikian, potensi *Smart Pavement* dalam meningkatkan efisiensi operasional dan keberlanjutan infrastruktur jalan membuatnya menjadi arah penting dalam pengembangan teknologi perkerasan masa depan.

## B. Perkerasan Kaku (*Rigid Pavement*)

Perkerasan kaku (*rigid pavement*) adalah sistem perkerasan jalan yang menggunakan beton semen sebagai bahan utama. Perkerasan ini memiliki kekakuan tinggi sehingga beban lalu lintas didistribusikan secara luas ke tanah dasar (*subgrade*) dengan tegangan permukaan yang relatif rendah dibandingkan perkerasan lentur. Struktur perkerasan kaku umumnya terdiri dari lapisan beton bertulang (*reinforced concrete*) atau beton tanpa tulangan (*plain concrete*), yang dirancang untuk menahan beban berat secara langsung (Huang, 2004). Keunggulan perkerasan kaku meliputi umur layanan yang panjang, ketahanan terhadap deformasi plastis (*rutting*), dan kebutuhan pemeliharaan yang rendah. Namun, biaya konstruksi awal perkerasan kaku relatif tinggi, serta memiliki sensitivitas terhadap retak akibat suhu dan pergerakan tanah.

### 1. Struktur Perkerasan Kaku

Struktur perkerasan kaku terdiri atas beberapa komponen penting:

- a. Lapisan Beton Permukaan (*Concrete Slab*): Lapisan beton berfungsi sebagai elemen struktural utama yang menahan beban lalu lintas. Tebal beton, mutu beton, dan jenis tulangan

mempengaruhi kapasitas beban perkerasan kaku. Fungsi lapisan beton:

- 1) Mendukung beban langsung kendaraan.
  - 2) Menyebarluaskan beban ke area luas tanah dasar.
  - 3) Menahan deformasi plastis dan keausan permukaan.
- b. Lapisan Dasar (*Base Course*): Lapisan ini berfungsi sebagai lapisan pendukung beton permukaan, meningkatkan ketahanan terhadap retak dan memfasilitasi distribusi beban. Base course pada perkerasan kaku biasanya terdiri dari agregat granular atau material stabilisasi.
- c. Lapisan Penopang Subgrade (*Subbase*): Berada di bawah base course, subbase berfungsi menstabilkan lapisan dasar dan meningkatkan drainase. Material granular seperti kerikil atau batu pecah biasanya digunakan sebagai subbase.
- d. Tanah Dasar (*Subgrade*): Subgrade berperan sebagai fondasi alami. Kualitas subgrade sangat menentukan kinerja perkerasan kaku, karena memiliki hubungan langsung dengan distribusi tegangan pada lapisan beton.

## 2. Karakteristik Perkerasan Kaku

Perkerasan kaku memiliki sifat mekanis yang berbeda dibanding perkerasan lentur:

- a. Kekakuan Tinggi: Beton memiliki modulus elastisitas yang sangat tinggi, sehingga distribusi beban ke area yang luas pada lapisan subgrade lebih efektif. Tegangan permukaan pada subgrade menjadi lebih rendah.
- b. Umur Layanan Panjang: Dengan desain dan material yang tepat, perkerasan kaku dapat berfungsi selama 20–40 tahun tanpa memerlukan perbaikan besar.
- c. Sensitivitas terhadap Retak: Meskipun kuat terhadap deformasi, beton relatif rapuh dan rentan terhadap retak thermal, shrinkage, dan pergerakan tanah.
- d. Rendahnya Kebutuhan Pemeliharaan: Perkerasan kaku membutuhkan pemeliharaan lebih sedikit dibanding perkerasan lentur, tetapi biaya perbaikan retakan relatif tinggi.

### **3. Desain Perkerasan Kaku**

#### **a. Metode Desain Westergaard**

Metode Desain Westergaard adalah pendekatan klasik yang digunakan untuk menganalisis distribusi tegangan dan regangan pada perkerasan kaku akibat beban lalu lintas. Metode ini berfokus pada perilaku lempengan beton yang berinteraksi dengan tanah dasar sebagai sistem elastis semi-infinite. Parameter utama dalam metode ini meliputi lebar lempengan, modulus elastisitas beton, dan sifat tanah dasar, yang mempengaruhi respons perkerasan terhadap beban.

Pendekatan Westergaard membantu insinyur menentukan ketebalan lempengan beton yang optimal agar mampu menahan tegangan tarik pada permukaan bawah beton. Metode ini juga digunakan untuk mendesain sambungan dan mengantisipasi retak akibat beban berulang. Meskipun telah ada metode desain modern seperti PCA dan AASHTO MEPDG, metode Westergaard tetap relevan sebagai dasar teoritis dan perbandingan dalam analisis perkerasan kaku, khususnya pada proyek dengan kondisi sederhana dan data terbatas.

#### **b. Metode AASHTO**

Metode desain AASHTO untuk perkerasan kaku merupakan pendekatan yang komprehensif, mengintegrasikan berbagai faktor seperti lalu lintas, kondisi iklim, kualitas bahan, dan ketebalan lapisan beton. Metode ini bertujuan untuk menentukan ketebalan perkerasan yang mampu memenuhi umur layanan yang diharapkan dengan mempertimbangkan kondisi operasional nyata di lapangan (AASHTO, 2015). Faktor lalu lintas dianalisis berdasarkan *Equivalent Single Axle Load* (ESAL), sedangkan kondisi iklim dan kualitas bahan mempengaruhi daya tahan beton terhadap retak dan deformasi.

Pendekatan ini mengacu pada data empiris dari hasil uji lapangan serta model prediktif yang telah divalidasi. Dengan mempertimbangkan semua variabel tersebut, metode AASHTO mampu menghasilkan desain perkerasan kaku yang lebih efisien dan ekonomis. Kelebihan metode ini adalah fleksibilitasnya dalam menyesuaikan faktor lokal, sehingga banyak digunakan pada proyek konstruksi jalan di berbagai kondisi iklim dan lalu lintas.

c. Metode Desain Mekanistik-Empiris

Metode desain mekanistik-empiris (*Mechanistic-Empirical Pavement Design*) menggabungkan prinsip-prinsip analisis mekanistik dengan data empiris dari uji laboratorium dan lapangan. Pendekatan ini memungkinkan perhitungan tegangan, regangan, dan respons material perkerasan terhadap beban lalu lintas secara lebih akurat, serta memperhitungkan kondisi lingkungan dan sifat material yang digunakan (Haas et al., 2007). Dengan demikian, metode ini dapat menghasilkan desain perkerasan kaku yang lebih tepat dan sesuai dengan kondisi nyata di lapangan dibanding metode konvensional.

Keunggulan metode mekanistik-empiris terletak pada kemampuannya untuk memprediksi umur layanan perkerasan berdasarkan parameter kinerja yang terukur, seperti fatigue cracking dan rutting. Metode ini juga lebih adaptif terhadap variasi lalu lintas dan kondisi iklim, sehingga meningkatkan efisiensi penggunaan material dan biaya konstruksi. Pendekatan ini kini menjadi standar pada desain perkerasan modern, termasuk dalam pedoman AASHTO MEPDG dan praktik desain jalan di berbagai negara.

d. Faktor-faktor Desain Perkerasan Kaku

- 1) Lalu lintas dan distribusi beban kendaraan.
- 2) Karakteristik beton (modulus elastisitas, kekuatan tekan).
- 3) Kondisi tanah dasar.
- 4) Faktor iklim (suhu, kelembaban).
- 5) Ketebalan beton dan jarak sambungan.

#### 4. Material Perkerasan Kaku

- a. Beton Semen Portland (*Portland Cement Concrete – PCC*): Material utama perkerasan kaku, memiliki ketahanan tinggi terhadap beban dan cuaca. Mutu beton, rasio air-semen, dan proporsi agregat mempengaruhi kinerja beton.
- b. Tulangan Beton: Tulangan baja digunakan pada perkerasan kaku bertulang (*reinforced concrete pavement – RCP*) untuk meningkatkankekakuan dan mengendalikan retak thermal.
- c. Admixtures dan Bahan Tambahan: Penambahan admixtures seperti fly ash, silica fume, atau bahan modifikasi lain dapat

meningkatkan ketahanan beton terhadap retak, shrinkage, dan serangan lingkungan.

## 5. Kelebihan dan Kekurangan Perkerasan Kaku

### a. Kelebihan

- 1) Umur layanan panjang (20–40 tahun).
- 2) Tahan terhadap deformasi plastis dan rutting.
- 3) Kebutuhan pemeliharaan relatif rendah.
- 4) Ketahanan terhadap bahan kimia dan bahan abrasif.

### b. Kekurangan

- 1) Biaya konstruksi awal tinggi.
- 2) Rentan terhadap retak thermal dan shrinkage
- 3) Proses konstruksi memerlukan waktu lebih lama.
- 4) Perbaikan retakan mahal dan kompleks.

## 6. Inovasi dalam Perkerasan Kaku

### a. *Self-Healing Concrete*

*Self-healing concrete* adalah inovasi dalam teknologi perkerasan kaku yang memungkinkan beton memperbaiki retakan kecil secara otomatis tanpa intervensi manusia. Teknologi ini memanfaatkan bahan tambahan seperti kapsul mikroorganisme atau polimer khusus yang bereaksi ketika retakan terbentuk, menghasilkan material pengisi yang menutup retakan tersebut (Vizzari et al., 2021). Pendekatan ini bertujuan meningkatkan umur layanan beton, mengurangi biaya pemeliharaan, dan memperbaiki kinerja struktural jalan dalam jangka panjang.

*Self-healing concrete* juga memberikan manfaat lingkungan dengan mengurangi frekuensi perbaikan dan penggunaan material tambahan. Meskipun masih dalam tahap pengembangan dan penelitian intensif, teknologi ini menunjukkan potensi signifikan untuk diaplikasikan pada jalan raya, landasan pacu, dan infrastruktur kritis lainnya. Tantangan utamanya adalah meningkatkan efektivitas dan menurunkan biaya produksi agar dapat diterapkan secara luas di lapangan.

### b. *Roller Compacted Concrete* (RCC)

*Roller Compacted Concrete* (RCC) adalah inovasi penting dalam teknologi perkerasan kaku yang memungkinkan konstruksi jalan dilakukan dengan cepat dan biaya yang relatif rendah. RCC

memiliki konsistensi yang lebih kaku dibanding beton konvensional sehingga dapat dipadatkan menggunakan roller berat, mirip dengan proses konstruksi perkerasan lentur. Metode ini mengurangi kebutuhan akan bekisting dan waktu penggeraan, sehingga sangat efektif untuk proyek skala besar seperti jalan tol dan landasan pacu bandara (Jamshidi & White, 2019).

RCC menawarkan daya tahan tinggi terhadap beban lalu lintas berat serta resistensi yang baik terhadap keausan dan deformasi. Namun, keberhasilan penerapan RCC tergantung pada kontrol kualitas yang ketat, mulai dari komposisi campuran beton hingga teknik pemanfaatan di lapangan. Kelebihan RCC menjadikannya solusi alternatif strategis untuk perkerasan kaku di proyek-proyek dengan skala besar dan waktu konstruksi terbatas.

c. Perkerasan Beton *Ultra-High Performance* (UHPC)

Perkerasan Beton *Ultra-High Performance* (UHPC) merupakan inovasi terdepan dalam teknologi perkerasan kaku yang menawarkan keunggulan signifikan dibanding beton konvensional. UHPC memiliki kekuatan tekan sangat tinggi, lebih dari 150 MPa, serta kepadatan yang tinggi sehingga mampu menahan beban lalu lintas berat dalam jangka panjang. Karakteristik ini membuat UHPC sangat tahan terhadap retak, abrasi, dan kerusakan akibat siklus beban berulang, sehingga memperpanjang umur layanan perkerasan secara signifikan (Mejłun et al., 2017).

UHPC juga memiliki sifat durabilitas tinggi terhadap kondisi lingkungan ekstrem seperti pembekuan-pencairan, siklus basah-kering, dan serangan kimia. Meskipun biaya awalnya relatif tinggi, efisiensi jangka panjang UHPC dalam hal pengurangan kebutuhan pemeliharaan dan perpanjangan masa layanan jalan menjadikannya pilihan strategis untuk proyek infrastruktur vital seperti jalan tol, jembatan, dan landasan pacu bandara. Inovasi ini menandai arah masa depan perkerasan kaku yang lebih berkelanjutan dan tahan lama.

d. Teknologi Sensor Pintar

Teknologi sensor pintar pada perkerasan kaku merupakan inovasi mutakhir yang memanfaatkan integrasi sensor ke dalam struktur beton untuk memantau kondisi jalan secara real-time. Sensor ini mampu mendeteksi berbagai parameter seperti retakan,

deformasi, suhu, kelembaban, dan beban lalu lintas. Data yang dikumpulkan kemudian dianalisis untuk menilai kondisi struktural perkerasan, sehingga memudahkan pengambilan keputusan terkait pemeliharaan dan rehabilitasi.

Keunggulan teknologi ini terletak pada kemampuannya untuk memberikan informasi akurat secara berkelanjutan, mengurangi kebutuhan inspeksi manual yang mahal dan memakan waktu. Selain itu, penerapan sensor pintar mendukung konsep infrastruktur cerdas (*smart infrastructure*) yang dapat meningkatkan efisiensi biaya pemeliharaan serta memperpanjang umur layanan jalan. Meski biaya awal implementasi masih tinggi, manfaat jangka panjang dari peningkatan keselamatan dan pengelolaan jalan membuat teknologi ini menjadi tren penting dalam desain perkerasan masa depan.

## C. Perkerasan Komposit

Perkerasan komposit (*composite pavement*) merupakan kombinasi struktur perkerasan lentur (*flexible pavement*) dan perkerasan kaku (*rigid pavement*), yang dirancang untuk memanfaatkan keunggulan kedua sistem tersebut. Konsep perkerasan komposit muncul sebagai solusi untuk meningkatkan kinerja perkerasan jalan, terutama pada jalan dengan lalu lintas tinggi, beban berat, dan kondisi iklim ekstrem. Secara umum, perkerasan komposit terdiri dari lapisan beton semen (*Portland Cement Concrete – PCC*) yang diletakkan di bawah lapisan aspal (*asphalt concrete – AC*), membentuk sistem perkerasan ganda. Beton memberikan kekakuan dan daya dukung struktural, sementara lapisan aspal berfungsi sebagai lapisan permukaan yang fleksibel dan nyaman untuk lalu lintas. Menurut Huang (2004), perkerasan komposit menggabungkan keunggulan perkerasan lentur dan kaku: kemampuan adaptasi terhadap pergerakan tanah dan distribusi beban yang baik dari beton, serta ketahanan permukaan terhadap aus dan retak dari lapisan aspal.

### 1. Struktur Perkerasan Komposit

Struktur perkerasan komposit biasanya terdiri dari beberapa lapisan:

- a. Lapisan Beton (*Concrete Slab*): Lapisan beton berada di bawah lapisan permukaan aspal. Beton berfungsi sebagai lapisan struktural utama, menahan beban lalu lintas dan mendistribusikan tegangan ke lapisan subgrade.
- b. Lapisan Aspal Permukaan (*Asphalt Concrete Surface Course*): Lapisan ini berada di atas beton dan berfungsi sebagai lapisan permukaan yang tahan aus, memiliki kenyamanan permukaan yang baik, serta mampu menyerap energi dari lalu lintas.
- c. Lapisan Pondasi dan Subbase: Lapisan pondasi granular atau subbase berada di bawah beton untuk memberikan dukungan struktural tambahan dan drainase yang baik.
- d. Tanah Dasar (*Subgrade*): Subgrade adalah lapisan tanah alami atau tanah stabilisasi yang berfungsi sebagai fondasi dari seluruh struktur perkerasan.

## 2. Karakteristik Perkerasan Komposit

Perkerasan komposit memiliki karakteristik unik yang membedakannya dari perkerasan lentur maupun kaku:

- a. Kombinasi Keunggulan Lentur dan Kaku: Lapisan beton memberikan kekakuan tinggi, sedangkan lapisan aspal memberikan fleksibilitas, kenyamanan permukaan, dan kemampuan perbaikan yang relatif mudah.
- b. Distribusi Beban yang Efisien: Beban lalu lintas didistribusikan melalui beton ke area yang lebih luas, sementara lapisan aspal menahan beban langsung dan memberikan daya dukung permukaan yang optimal.
- c. Ketahanan terhadap Retak dan Rutting: Lapisan beton mengurangi risiko rutting, sedangkan lapisan aspal mengurangi risiko retak thermal dan fatigue cracking pada permukaan jalan.
- d. Umur Layanan yang Lebih Panjang: Dengan kombinasi lapisan beton dan aspal, perkerasan komposit memiliki umur layanan yang lebih panjang dibanding perkerasan lentur, serta membutuhkan pemeliharaan yang lebih rendah dibanding perkerasan kaku.

## 3. Desain Perkerasan Komposit

Desain perkerasan komposit menggabungkan pendekatan mekanistik-empiris untuk memastikan kinerja optimal:

a. Ketebalan Lapisan Beton

Ketebalan lapisan beton pada perkerasan komposit merupakan faktor krusial yang memengaruhi kinerja dan umur layanan jalan. Penentuan ketebalan ini harus mempertimbangkan kapasitas beban lalu lintas yang akan dilalui, termasuk jumlah dan distribusi beban sumbu (ESAL), sehingga beton mampu menahan tegangan tarik di bawah beban tanpa mengalami retak dini (AASHTO, 2015). Faktor modulus elastisitas beton juga menjadi pertimbangan penting karena memengaruhi kemampuan beton dalam mendistribusikan beban ke lapisan bawah secara efektif.

Kondisi tanah dasar (*subgrade*) memiliki peran signifikan dalam menentukan ketebalan beton. Tanah dasar dengan daya dukung rendah memerlukan lapisan beton yang lebih tebal untuk mengurangi regangan tarik pada permukaan bawah beton. Umur layanan yang diharapkan juga memengaruhi desain, karena ketebalan beton harus direncanakan agar sesuai dengan target umur jalan, mengingat faktor biaya dan efisiensi pemeliharaan. Pendekatan desain ini menjamin perkerasan komposit memiliki kinerja optimal dalam jangka panjang.

b. Ketebalan Lapisan Aspal

Ketebalan lapisan aspal pada perkerasan komposit dirancang untuk memastikan kenyamanan berkendara, ketahanan terhadap aus, serta perlindungan terhadap retak thermal yang dapat timbul akibat perubahan suhu. Lapisan aspal berfungsi sebagai lapisan permukaan yang langsung menerima beban lalu lintas dan pengaruh lingkungan, sehingga ketebalannya harus cukup untuk menahan deformasi permukaan dan menjaga integritas struktural jalan. Ketebalan ini juga berperan dalam menyerap energi beban lalu lintas, sehingga mengurangi regangan tarik pada lapisan beton di bawahnya.

Kualitas lapisan beton di bawah lapisan aspal menjadi faktor penting dalam perencanaan ketebalan lapisan aspal. Beton dengan kualitas tinggi dan ketebalan optimal dapat menurunkan kebutuhan ketebalan aspal, karena beban sudah didistribusikan lebih efektif ke lapisan bawah. Sebaliknya, jika lapisan beton memiliki modulus elastisitas rendah atau mengalami degradasi, lapisan aspal harus lebih tebal untuk menjaga kinerja perkerasan.

c. Sambungan Beton

Desain sambungan beton pada perkerasan komposit berperanan penting untuk menjaga kinerja struktural dan menghindari kerusakan dini pada lapisan permukaan. Sambungan yang dirancang dengan baik mampu menahan perpindahan relatif antar slab beton akibat perubahan suhu, beban lalu lintas, dan penyusutan beton. Menurut Jamshidi dan White (2019), sambungan yang memiliki kapasitas perpindahan optimal dapat mengurangi konsentrasi tegangan pada ujung slab, sehingga meminimalkan terjadinya retak pada lapisan aspal di atasnya.

Desain sambungan juga harus memperhatikan pencegahan infiltrasi air. Air yang masuk melalui sambungan dapat merusak lapisan pondasi dan mempercepat degradasi lapisan beton maupun aspal. Oleh karena itu, penggunaan sealant berkualitas tinggi dan sistem sambungan yang tahan lama sangat diperlukan. Pendekatan ini tidak hanya meningkatkan umur layanan perkerasan komposit tetapi juga mengurangi biaya pemeliharaan jangka panjang.

d. Perhitungan Faktor Lingkungan

Perhitungan faktor lingkungan merupakan aspek krusial dalam desain perkerasan komposit karena kondisi iklim berpengaruh signifikan terhadap performa jalan. Variabel seperti suhu, curah hujan, kelembaban, dan siklus pembekuan-pencairan mempengaruhi sifat mekanik material perkerasan, termasuk beton dan aspal. Menurut Atmanegara (2017), fluktuasi suhu dapat menyebabkan ekspansi dan kontraksi material, sehingga memicu retak termal dan perpindahan sambungan. Curah hujan dan kelembaban tinggi juga dapat mempercepat degradasi lapisan pondasi melalui penetrasi air, yang berpotensi menurunkan daya dukung tanah dasar.

Analisis faktor lingkungan dilakukan dengan mengumpulkan data klimatologi dari lokasi proyek dan mengintegrasikannya ke dalam model desain. Data ini digunakan untuk menentukan ketebalan lapisan, jenis material, serta perlakuan sambungan yang sesuai. Dengan memperhitungkan kondisi lingkungan sejak tahap desain, umur layanan perkerasan komposit dapat ditingkatkan secara signifikan. Pendekatan ini membantu

meminimalkan biaya perawatan dan memastikan kinerja jalan yang optimal sepanjang siklus hidupnya.

#### 4. Material Perkerasan Komposit

- a. Beton Semen Portland (*Portland Cement Concrete – PCC*):  
Beton digunakan sebagai lapisan struktural utama. Beton berkualitas tinggi dengan rasio air-semen yang tepat akan meningkatkan daya tahan terhadap retak dan deformasi.
- b. Aspal Beton (*Asphalt Concrete – AC*): Aspal beton berfungsi sebagai lapisan permukaan yang memberikan kenyamanan dan ketahanan aus. Penggunaan campuran aspal panas (HMA) atau aspal dingin (CMA) dapat disesuaikan dengan kondisi lingkungan dan lalu lintas.
- c. Lapisan Interlayer: Lapisan interlayer digunakan di antara beton dan aspal untuk mengurangi risiko reflective cracking. Interlayer biasanya terdiri dari geotekstil, membran elastomer, atau aspal modifikasi polimer.

#### 5. Kelebihan dan Kekurangan Perkerasan Komposit

- a. Kelebihan
  - 1) Menggabungkan kekakuan beton dan fleksibilitas aspal.
  - 2) Mengurangi risiko rutting dan *fatigue cracking*.
  - 3) Memberikan umur layanan lebih panjang dibanding perkerasan lentur.
  - 4) Pemeliharaan lebih mudah dibanding perkerasan kaku penuh.
- b. Kekurangan
  - 1) Biaya konstruksi awal lebih tinggi dibanding perkerasan lentur.
  - 2) Memerlukan teknologi sambungan beton yang baik untuk mencegah *reflective cracking*.
  - 3) Perbaikan lapisan aspal memerlukan perhatian khusus untuk menjaga integritas lapisan beton di bawahnya.

#### 6. Inovasi dalam Perkerasan Komposit

- a. Interlayer Pintar

Pengembangan interlayer pintar dalam perkerasan komposit merupakan inovasi terkini yang bertujuan meningkatkan

performa dan umur layanan jalan. Interlayer pintar dirancang dengan bahan adaptif yang mampu menyesuaikan sifat mekaniknya, seperti modulus elastisitas dan kemampuan meredam tegangan, sesuai kondisi beban dan suhu lingkungan. Teknologi ini memungkinkan perkerasan menahan deformasi akibat beban lalu lintas yang bervariasi serta mengurangi retak termal pada lapisan permukaan.

Interlayer pintar juga berperan dalam efisiensi biaya pemeliharaan jalan. Dengan kemampuannya beradaptasi secara otomatis, teknologi ini dapat meminimalkan frekuensi perbaikan dan memperpanjang siklus hidup perkerasan. Integrasi sensor dan material cerdas dalam lapisan ini juga memungkinkan monitoring kondisi struktural secara real-time, yang mendukung strategi pemeliharaan preventif dan adaptif. Inovasi ini menjanjikan revolusi dalam desain dan pemeliharaan perkerasan komposit di masa depan.

b. Perkerasan Beton Modifikasi

Penggunaan beton modifikasi dalam perkerasan komposit merupakan inovasi penting untuk meningkatkan ketahanan struktural jalan. Beton modifikasi dibuat dengan menambahkan admixtures khusus seperti serat polimer, silica fume, atau bahan pengubah sifat termal. Admixtures ini dapat meningkatkan kemampuan beton untuk menahan retak thermal dan shrinkage akibat perubahan suhu serta beban lalu lintas berulang. Dengan demikian, umur layanan perkerasan dapat diperpanjang secara signifikan.

Beton modifikasi juga meningkatkan kinerja mekanik dan daya tahan terhadap kondisi lingkungan ekstrem. Admixtures tertentu dapat memperbaiki cohesiveness beton, mengurangi permeabilitas, dan meningkatkan modulus elastisitasnya. Hal ini menjadikan beton modifikasi pilihan strategis dalam perkerasan komposit, terutama pada daerah dengan fluktuasi suhu tinggi atau beban lalu lintas berat. Dengan penerapan beton modifikasi, desain perkerasan menjadi lebih efisien dari sisi kinerja dan biaya pemeliharaan jangka panjang.

c. Pemanfaatan Material Daur Ulang

Pemanfaatan material daur ulang dalam perkerasan komposit menjadi inovasi penting untuk menciptakan konstruksi jalan

yang lebih berkelanjutan. Material seperti *Reclaimed Asphalt Pavement* (RAP) dan beton daur ulang dapat digunakan kembali sebagai bahan lapisan aspal atau beton. Menurut Jamshidi dan White (2019), penggunaan material daur ulang tidak hanya mengurangi kebutuhan bahan baku baru tetapi juga menurunkan biaya konstruksi secara signifikan. Selain itu, pemanfaatan material ini membantu mengurangi timbunan limbah konstruksi, sehingga memberikan kontribusi positif terhadap pengelolaan lingkungan.

Material daur ulang juga memiliki potensi meningkatkan sifat mekanik perkerasan. Proses daur ulang yang baik dapat menghasilkan material dengan kualitas setara atau bahkan lebih baik dibandingkan bahan baru, tergantung pada metode pengolahan dan stabilisasi yang digunakan. Dengan penerapan teknologi pengolahan yang tepat, material daur ulang dapat digunakan secara efektif dalam desain perkerasan komposit, sehingga mendukung inovasi jalan yang ramah lingkungan dan efisien secara ekonomi.

d. Digitalisasi Desain

Digitalisasi desain perkerasan komposit telah menjadi langkah revolusioner dalam dunia teknik jalan. Penggunaan software mekanistik-empiris berbasis *Building Information Modeling* (BIM) memungkinkan perencanaan dan analisis yang lebih akurat dan efisien. Pendekatan ini mengintegrasikan data lalu lintas, sifat material, kondisi lingkungan, dan kriteria desain ke dalam satu platform digital, sehingga menghasilkan model perkerasan yang komprehensif dan dapat dioptimalkan sebelum konstruksi.

Digitalisasi juga mempermudah kolaborasi antar pemangku kepentingan dalam proyek konstruksi jalan. Dengan BIM, semua pihak dapat mengakses data desain secara real-time, meminimalkan risiko kesalahan, dan mempercepat proses pengambilan keputusan. Hal ini tidak hanya memperbaiki efisiensi proyek tetapi juga mendukung inovasi berkelanjutan dalam teknologi perkerasan komposit, menjadikan digitalisasi sebagai elemen penting dalam masa depan industri jalan raya.

## D. Perbandingan Kinerja dan Biaya

Pemilihan jenis perkerasan jalan merupakan keputusan strategis dalam perencanaan dan konstruksi jalan. Keputusan tersebut harus mempertimbangkan kinerja teknis dan biaya ekonomi dalam jangka pendek maupun jangka panjang. Perkerasan jalan dapat berupa perkerasan lentur (*flexible pavement*), perkerasan kaku (*rigid pavement*), dan perkerasan komposit (*composite pavement*), masing-masing memiliki karakteristik, keunggulan, kelemahan, serta biaya yang berbeda.

### 1. Kinerja Perkerasan Jalan

Kinerja perkerasan jalan diukur melalui indikator seperti:

- a. Umur layanan (*service life*).
  - b. Ketahanan terhadap deformasi plastis (*rutting*).
  - c. Resistensi terhadap retak (*cracking*).
  - d. Kestabilan struktural terhadap beban lalu lintas berulang.
  - e. Ketahanan terhadap pengaruh lingkungan.
- a. Perkerasan Lentur (*Flexible Pavement*)
- Perkerasan lentur terbuat dari lapisan beraspal yang menyalurkan beban kendaraan melalui distribusi tegangan secara bertingkat ke lapisan bawah (*layered system*). Keunggulan perkerasan lentur meliputi:
- 1) Kemampuan menahan deformasi lokal.
  - 2) Perbaikan yang relatif sederhana dan cepat.
  - 3) Fleksibilitas terhadap pergerakan tanah dasar.
- Perkerasan lentur cenderung lebih rentan terhadap rutting, fatigue cracking, dan membutuhkan pemeliharaan berkala, terutama pada kondisi lalu lintas tinggi. Umur layanan perkerasan lentur biasanya berkisar antara 8–20 tahun, tergantung pada kondisi lalu lintas, kualitas material, dan kondisi iklim.
- b. Perkerasan Kaku (*Rigid Pavement*)

Perkerasan kaku terbuat dari beton semen (*Portland Cement Concrete – PCC*) yang memiliki modulus elastisitas tinggi, sehingga beban didistribusikan ke area yang lebih luas. Keunggulan perkerasan kaku meliputi:

- 1) Umur layanan panjang (20–40 tahun).

- 2) Resistensi tinggi terhadap deformasi plastis (*rutting*).
- 3) Stabilitas struktural yang tinggi terhadap beban berat.

Kelemahan perkerasan kaku adalah biaya konstruksi awal yang tinggi, sensitivitas terhadap retak thermal dan shrinkage, serta pemeliharaan sambungan beton yang memerlukan perhatian khusus.

c. Perkerasan Komposit (*Composite Pavement*)

Perkerasan komposit menggabungkan keunggulan perkerasan lentur dan kaku dengan menempatkan lapisan beton di bawah lapisan aspal. Keunggulan perkerasan komposit meliputi:

- 1) Distribusi beban yang optimal.
- 2) Ketahanan terhadap rutting dan retak thermal.
- 3) Umur layanan yang lebih panjang dibanding perkerasan lentur.

Perkerasan komposit memerlukan desain sambungan beton yang matang dan penggunaan lapisan interlayer yang efektif untuk mencegah *reflective cracking* pada lapisan aspal. Umur layanan perkerasan komposit dapat mencapai 25–30 tahun dengan perawatan yang tepat.

## 2. Perbandingan Biaya Perkerasan Jalan

Biaya perkerasan jalan meliputi:

- a. Biaya konstruksi awal (*initial construction cost*).
- b. Biaya pemeliharaan (*maintenance cost*).
- c. Biaya rehabilitasi atau rekonstruksi (*rehabilitation cost*).
- d. Biaya keseluruhan sepanjang umur layanan (*life-cycle cost*).

Pendekatan *Life-Cycle Cost Analysis* (LCCA) menjadi metode penting dalam membandingkan efisiensi biaya masing-masing jenis perkerasan (AASHTO, 2015).

a. Perkerasan Lentur

- 1) Biaya konstruksi awal: Relatif rendah dibanding perkerasan kaku, karena material beraspal lebih murah dan metode konstruksi lebih sederhana.
- 2) Biaya pemeliharaan: Lebih tinggi karena perkerasan lentur memerlukan perawatan berkala seperti overlay, perbaikan retak, dan pemeliharaan permukaan.
- 3) Biaya rehabilitasi: Cenderung tinggi dalam jangka panjang jika lalu lintas padat dan beban berat terus meningkat.

- b. Perkerasan Kaku
  - 1) Biaya konstruksi awal: Tinggi karena beton semen memerlukan material dan tenaga kerja lebih mahal.
  - 2) Biaya pemeliharaan: Rendah, karena perkerasan kaku memiliki umur layanan panjang dan memerlukan perbaikan minor selama periode operasi.
  - 3) Biaya rehabilitasi: Rendah, tetapi perbaikan besar seperti rekonstruksi lempengan beton memerlukan biaya tinggi jika diperlukan.
- c. Perkerasan Komposit
  - 1) Biaya konstruksi awal: Lebih tinggi dibanding perkerasan lentur, tetapi lebih rendah dibanding perkerasan kaku penuh.
  - 2) Biaya pemeliharaan: Menengah, karena lapisan aspal memerlukan perawatan, tetapi ketahanan lapisan beton menekan kebutuhan perawatan besar.
  - 3) Biaya rehabilitasi: Relatif rendah jika sambungan beton dirancang dengan baik dan lapisan interlayer efektif mencegah retak.

Perhitungan *Life-Cycle Cost Analysis* menunjukkan bahwa perkerasan komposit memiliki biaya keseluruhan yang kompetitif pada jalan dengan lalu lintas tinggi dan kondisi lingkungan ekstrem.

### 3. Perbandingan Kinerja dan Biaya

Studi AASHTO (2015) mengenai Analisis *Life Cycle Cost Analysis* (LCCA) terhadap jalan tol di Amerika Serikat menunjukkan temuan signifikan terkait pilihan tipe perkerasan. Analisis tersebut membandingkan perkerasan kaku dan lentur pada jalan dengan volume lalu lintas tinggi ( $>20$  juta ESAL) dalam jangka panjang. Hasil penelitian menunjukkan bahwa meskipun perkerasan kaku memiliki biaya konstruksi awal yang lebih tinggi, umur layanan yang lebih panjang dan kebutuhan pemeliharaan yang lebih sedikit membuat biaya keseluruhan menjadi lebih rendah dibandingkan perkerasan lentur.

Perkerasan kaku memiliki keunggulan dalam hal ketahanan terhadap deformasi permanen dan retak akibat beban lalu lintas tinggi. Faktor ini membuatnya ideal untuk jalan tol yang dilalui kendaraan berat secara terus-menerus. Menurut AASHTO (2015), umur layanan perkerasan kaku bisa mencapai dua kali lipat dibanding perkerasan lentur

pada kondisi lalu lintas yang sama, sehingga mengurangi frekuensi rehabilitasi dan gangguan lalu lintas akibat perbaikan jalan. Hal ini berdampak pada efisiensi operasional dan keselamatan lalu lintas.

Perbedaan biaya konstruksi awal tetap menjadi pertimbangan penting dalam pemilihan tipe perkerasan. LCCA membantu memvisualisasikan total biaya sepanjang umur layanan jalan, termasuk biaya konstruksi, pemeliharaan, rehabilitasi, dan kerugian ekonomi akibat gangguan lalu lintas. Studi AASHTO menegaskan bahwa meskipun investasi awal perkerasan kaku lebih tinggi, nilai ekonomisnya dalam jangka panjang justru lebih efisien pada proyek dengan volume lalu lintas tinggi, sehingga menjadikannya pilihan strategis untuk infrastruktur jalan utama.

#### 4. Analisis *Life-Cycle Cost* (LCCA)

LCCA adalah metode untuk menilai total biaya perkerasan sepanjang umur layanan, termasuk konstruksi awal, pemeliharaan, dan rehabilitasi. Analisis ini penting untuk pengambilan keputusan investasi jalan.

Tabel 1. Rangkuman LCCA

Jenis Perkerasan	Umur Layanan (tahun)	Biaya Awal	Biaya Pemeliharaan	Biaya Rehabilitasi	Total Biaya LCCA
Lentur	8–20	Rendah	Tinggi	Tinggi	Tinggi
Kaku	20–40	Tinggi	Rendah	Rendah	Rendah
Komposit	25–30	Sedang	Sedang	Sedang	Menengah–Rendah





# BAB IV

## MATERIAL UNTUK PERKERASAN

---

Material perkerasan adalah elemen utama yang menentukan kekuatan, ketahanan, dan performa jalan. Pemilihan material yang tepat bukan hanya soal memenuhi standar teknis, tetapi juga mempertimbangkan faktor lingkungan, ketersediaan sumber daya, biaya, dan keberlanjutan. Perkerasan jalan modern memanfaatkan berbagai material mulai dari tanah dasar (*subgrade*), agregat, aspal, semen, hingga material inovatif seperti geosintetik dan bahan daur ulang. Pemahaman tentang karakteristik dan sifat material menjadi prasyarat penting dalam proses perencanaan dan konstruksi perkerasan.

Bab ini membahas material perkerasan secara komprehensif, mulai dari tanah dasar yang menjadi lapisan penopang, agregat untuk lapisan base dan subbase, hingga bahan pengikat seperti aspal dan semen untuk perkerasan lentur dan kaku. Selain itu, dibahas juga material inovatif seperti *Reclaimed Asphalt Pavement* (RAP), geosintetik, dan material hijau yang ramah lingkungan. Bab ini menjelaskan sifat fisik dan mekanis material, metode pengujian, serta kriteria pemilihan material sesuai kondisi teknis dan ekonomi. Pemahaman ini membantu perancang jalan dalam menentukan material yang optimal untuk tiap proyek.

### A. Tanah Dasar (Subgrade)

Tanah dasar atau subgrade adalah lapisan tanah alami atau tanah yang telah diperbaiki yang berada di bawah lapisan perkerasan. Subgrade berfungsi sebagai fondasi struktural yang menopang seluruh lapisan perkerasan jalan. Performa dan umur layanan jalan sangat bergantung pada kondisi dan kualitas tanah dasar (Huang, 2004). Dalam desain Buku Referensi

perkerasan jalan, tanah dasar tidak hanya berfungsi sebagai penopang beban lalu lintas tetapi juga berperan dalam distribusi tegangan ke lapisan bawah secara merata. Oleh karena itu, karakteristik mekanik tanah dasar menjadi faktor penting yang harus dianalisis secara mendalam. Kesalahan dalam penilaian sifat tanah dasar merupakan penyebab utama kegagalan perkerasan jalan, termasuk deformasi permanen (*rutting*), retak, dan penurunan permukaan jalan.

## 1. Fungsi Tanah Dasar dalam Struktur Perkerasan

Tanah dasar memiliki peran penting dalam struktur perkerasan, yaitu:

- a. Menopang Beban Lalu Lintas: Subgrade mentransfer beban dari lapisan perkerasan ke lapisan bawah tanah secara aman.
- b. Mendistribusikan Tegangan: Tanah dasar menyebarluaskan tegangan yang diterima dari lapisan perkerasan sehingga mengurangi konsentrasi tegangan pada titik tertentu.
- c. Menentukan Ketebalan Lapisan Perkerasan: Kondisi tanah dasar menentukan ketebalan lapisan perkerasan yang diperlukan. Tanah dasar dengan kualitas rendah memerlukan lapisan perkerasan yang lebih tebal untuk mendukung beban lalu lintas.
- d. Pengaruh terhadap Performa Jalan: Kualitas subgrade memengaruhi umur layanan jalan. Tanah dasar yang kuat akan memperpanjang umur perkerasan, sedangkan tanah dasar lemah akan mempercepat kerusakan jalan.

## 2. Karakteristik Tanah Dasar

Penilaian tanah dasar dilakukan melalui sifat fisik dan mekanik yang memengaruhi kinerja perkerasan. Karakteristik penting tanah dasar meliputi:

- a. Modulus Resiliensi (*Resilient Modulus – Mr*): Modulus resiliensi adalah ukuran kemampuan tanah dasar untuk menahan deformasi elastis di bawah beban lalu lintas berulang. Nilai Mr sangat penting dalam perhitungan ketebalan perkerasan.
- b. CBR (*California Bearing Ratio*): CBR adalah parameter penting untuk menilai kekuatan tanah dasar, terutama dalam desain perkerasan lentur. Tanah dengan CBR tinggi menunjukkan kapasitas dukung yang baik.

- c. Kepadatan dan Kadar Air: Kepadatan dan kadar air tanah dasar memengaruhi kapasitas dukungnya. Tanah yang terlalu lembab atau kurang padat memiliki daya dukung rendah.
- d. Koefisien Permeabilitas: Koefisien permeabilitas tanah menentukan kemampuan tanah dalam mengalirkan air. Tanah dasar yang buruk dalam drainase dapat menyebabkan kerusakan perkerasan akibat kelembaban berlebih.
- e. Karakteristik Plastikitas: Tanah dengan nilai Indeks Plastikitas (PI) tinggi cenderung mengalami deformasi dan penurunan kuat tekan jika terkena kelembaban tinggi.

### 3. Klasifikasi Tanah Dasar

Berdasarkan sifat mekaniknya, tanah dasar dapat diklasifikasikan menjadi beberapa kategori:

- a. Tanah Granular: Tanah granular seperti pasir dan kerikil memiliki sifat drainase baik, kekuatan tinggi, dan stabilitas yang baik. Tanah granular merupakan jenis tanah dasar yang ideal untuk perkerasan.
- b. Tanah Lempung (Clay): Tanah lempung memiliki daya dukung rendah dan rentan terhadap perubahan volume akibat perubahan kadar air. Tanah lempung membutuhkan perbaikan khusus sebelum digunakan sebagai subgrade.
- c. Tanah Berbutir Halus dengan Plastikitas Rendah (Silt): Tanah jenis ini memiliki permeabilitas rendah dan rentan terhadap perubahan kelembaban, sehingga memerlukan perbaikan dan stabilisasi.
- d. Tanah Organik: Tanah organik memiliki daya dukung sangat rendah dan deformasi tinggi. Tidak direkomendasikan sebagai subgrade tanpa stabilisasi ekstensif.

### 4. Metode Penilaian Tanah Dasar

Penilaian tanah dasar dilakukan melalui serangkaian uji laboratorium dan lapangan:

- a. Uji Laboratorium
  - 1) Uji CBR (*California Bearing Ratio*).
  - 2) Uji Proktor untuk kepadatan optimum.
  - 3) Uji nilai PI (*Plasticity Index*) dan LL (*Liquid Limit*).

- b. Uji Lapangan
  - 1) *Falling Weight Deflectometer* (FWD) untuk menilai modulus resiliensi.
  - 2) *Plate Load Test* untuk menentukan kapasitas dukung.
  - 3) *Dynamic Cone Penetrometer* (DCP) untuk evaluasi cepat kondisi subgrade.

Penilaian yang akurat terhadap tanah dasar dapat mengoptimalkan desain ketebalan perkerasan sehingga biaya konstruksi dan pemeliharaan dapat ditekan.

## 5. Pengaruh Kondisi Tanah Dasar terhadap Desain Perkerasan

Kualitas tanah dasar menentukan strategi desain perkerasan. Beberapa pengaruh utama meliputi:

- a. Ketebalan Perkerasan

Kondisi tanah dasar (*subgrade*) memiliki pengaruh signifikan terhadap desain perkerasan jalan, terutama dalam penentuan ketebalan lapisan perkerasan. Tanah dasar berdaya dukung rendah, seperti tanah lunak atau tanah organik, cenderung mengalami deformasi lebih besar ketika menerima beban lalu lintas. Akibatnya, tegangan dan regangan pada lapisan perkerasan meningkat, yang dapat mempercepat kerusakan seperti retak dan deformasi permanen. Untuk mengantisipasi hal ini, ketebalan lapisan perkerasan harus ditingkatkan agar beban lalu lintas dapat didistribusikan secara optimal ke tanah dasar, sehingga umur layanan jalan dapat dipertahankan.

Penentuan ketebalan lapisan perkerasan harus mempertimbangkan nilai CBR (*California Bearing Ratio*) atau modulus elastisitas tanah dasar. Tanah dasar dengan CBR rendah memerlukan peningkatan ketebalan perkerasan atau penerapan teknik stabilisasi tanah untuk meningkatkan daya dukung. Dengan perencanaan yang tepat, peningkatan ketebalan lapisan perkerasan akan memastikan struktur jalan tetap kuat dan aman meskipun kondisi tanah dasar kurang ideal, sehingga biaya pemeliharaan dapat ditekan dalam jangka panjang.

- b. Jenis Perkerasan

Tanah dasar yang memiliki daya dukung rendah memerlukan perhatian khusus dalam pemilihan jenis perkerasan. Perkerasan kaku dan perkerasan komposit menjadi pilihan yang lebih sesuai

dibandingkan perkerasan lentur karena kemampuan distribusi bebananya yang lebih baik. Perkerasan kaku, seperti beton, memiliki modulus elastisitas tinggi sehingga mampu menyebarluaskan beban lalu lintas ke area yang lebih luas pada tanah dasar, sehingga mengurangi tekanan lokal yang dapat menyebabkan deformasi atau kerusakan. Sedangkan perkerasan komposit memanfaatkan kombinasi lapisan beton dan aspal, yang memberikan keunggulan dari kedua sistem perkerasan tersebut, termasuk ketahanan terhadap beban berat sekaligus kenyamanan permukaan jalan (Robinson & Thagesen, 2018).

Pemilihan jenis perkerasan juga mempertimbangkan faktor umur layanan dan biaya pemeliharaan. Perkerasan kaku memiliki umur layanan lebih panjang tetapi biaya awal konstruksinya relatif tinggi, sedangkan perkerasan komposit menawarkan keseimbangan antara biaya konstruksi dan performa jangka panjang. Oleh karena itu, pada tanah dasar yang lemah, penggunaan perkerasan kaku atau komposit dapat menjadi solusi efektif untuk memastikan kekuatan struktur jalan dan meminimalkan biaya pemeliharaan di masa depan.

c. Pemilihan Material Perbaikan

Pemilihan material perbaikan tanah dasar menjadi langkah krusial dalam desain perkerasan, terutama pada kondisi tanah yang memiliki daya dukung rendah atau rentan terhadap perubahan kelembaban. Material stabilisasi seperti kapur dan semen umum digunakan untuk meningkatkan kekuatan tanah melalui proses pengikatan partikel tanah, sehingga meningkatkan modulus elastisitas dan mengurangi deformasi permanen. Kapur efektif pada tanah liat karena dapat mengurangi plastisitas dan meningkatkan stabilitas, sedangkan semen memberikan peningkatan kekakuan dan daya dukung yang signifikan pada berbagai jenis tanah (Gonçalves & Margarido, 2016).

Penggunaan bahan geosintetik seperti geotekstil dan geogrid juga semakin populer sebagai solusi stabilisasi tanah dasar. Geosintetik berfungsi memperkuat lapisan tanah, meningkatkan drainase, dan mengurangi pergerakan tanah akibat beban lalu lintas. Keunggulan bahan ini termasuk kemudahan pemasangan dan efektivitas biaya, khususnya pada proyek dengan kondisi tanah yang luas dan beragam. Pendekatan kombinasi stabilisasi

kimia dan penggunaan geosintetik memberikan hasil yang optimal dalam meningkatkan kinerja struktur perkerasan secara keseluruhan.

## 6. Perbaikan Tanah Dasar (*Subgrade Improvement*)

Perbaikan tanah dasar dilakukan ketika kondisi subgrade tidak memenuhi syarat teknis. Metode perbaikan meliputi:

### a. Stabilitas Mekanik

Perbaikan tanah dasar dengan fokus pada stabilitas mekanik bertujuan meningkatkan kapasitas dukung subgrade sehingga mampu menahan beban lalu lintas tanpa mengalami deformasi berlebihan. Salah satu metode paling umum adalah kompaksi tanah, yang dilakukan dengan alat berat seperti roller atau vibratory compactor untuk memadatkan butiran tanah. Proses ini mengurangi porositas tanah, meningkatkan kepadatan, dan meningkatkan modulus elastisitas, sehingga struktur perkerasan menjadi lebih stabil dan umur layanannya lebih panjang.

Penggunaan bahan granular seperti kerikil atau pasir juga menjadi metode efektif untuk meningkatkan stabilitas mekanik tanah dasar. Material granular berfungsi sebagai lapisan perantara yang mendistribusikan beban secara merata dan memperkuat struktur subgrade. Metode ini efektif untuk tanah yang memiliki daya dukung rendah atau rentan terhadap perubahan kelembaban. Dengan kombinasi kompaksi dan penggunaan material granular, perbaikan subgrade dapat memberikan kontribusi signifikan terhadap kinerja dan umur panjang perkerasan jalan.

### b. Stabilitas Kimia

Stabilitas kimia pada perbaikan tanah dasar dilakukan dengan menambahkan bahan stabilisasi seperti kapur, semen, atau fly ash untuk meningkatkan kekuatan mekanik dan mengurangi sifat plastisitas tanah. Proses ini bekerja melalui reaksi kimia yang mengubah struktur mineral tanah sehingga memperbaiki kapasitas dukungnya. Kapur, misalnya, bereaksi dengan tanah liat membentuk senyawa kalsium silikat yang meningkatkan kekakuan tanah, sementara semen memberikan ikatan tambahan yang meningkatkan kekuatan tekan subgrade.

Fly ash juga digunakan sebagai bahan stabilisasi alternatif yang ramah lingkungan karena memanfaatkan limbah industri. Material ini meningkatkan kekuatan dan mengurangi penyusutan tanah dengan mengubah sifat fisik dan kimia tanah. Keunggulan stabilisasi kimia adalah kemampuannya menciptakan subgrade yang tahan terhadap perubahan kelembaban dan siklus beban lalu lintas, sehingga meningkatkan umur layanan perkerasan jalan secara signifikan.

c. Geosintetik

Penggunaan geosintetik seperti geotekstil, geogrid, dan geomembrane merupakan metode inovatif dalam perbaikan tanah dasar (*subgrade improvement*) untuk perkerasan jalan. Geotekstil berfungsi sebagai lapisan pemisah (*separation*) yang mencegah tercampurnya material subgrade dan agregat, sehingga menjaga kestabilan struktur perkerasan. Geogrid memberikan penguatan mekanis dengan mendistribusikan beban secara merata dan meningkatkan kapasitas dukung tanah dasar, sementara geomembrane berperan sebagai lapisan impermeabel yang mengontrol pergerakan air dan memperbaiki drainase.

Keunggulan penggunaan geosintetik terletak pada efisiensi biaya dan waktu konstruksi, serta kemampuannya meningkatkan umur layanan jalan. Geosintetik membantu mengurangi deformasi permanen akibat beban lalu lintas berat dan memperlambat kerusakan perkerasan. Selain itu, sistem drainase yang terintegrasi dengan geosintetik mengurangi risiko kelembaban berlebih pada subgrade, sehingga meningkatkan kinerja struktural jalan dalam jangka panjang.

d. Drainase Subgrade

Perbaikan drainase tanah dasar (*subgrade improvement*) merupakan aspek krusial dalam menjaga daya dukung dan umur layanan perkerasan jalan. Kelembaban yang tinggi pada tanah dasar dapat menurunkan modulus elastisitas dan kekuatan tanah, sehingga meningkatkan risiko deformasi permanen seperti rutting. Untuk mengatasinya, pemasangan saluran drainase menjadi solusi penting. Sistem drainase ini berfungsi mengalirkan air permukaan maupun air tanah ke luar struktur perkerasan sehingga menjaga kondisi subgrade tetap kering dan stabil.

Lapisan permeabel seperti agregat berbutir besar atau geosintetik permeabel juga digunakan untuk memperbaiki drainase subgrade. Lapisan ini memungkinkan air meresap ke saluran drainase tanpa mengganggu kekuatan struktur perkerasan. Dengan perbaikan drainase yang optimal, tanah dasar dapat mempertahankan kapasitas dukungnya sehingga perkerasan jalan menjadi lebih tahan terhadap beban lalu lintas dan kondisi lingkungan, serta memperpanjang umur layanan jalan secara signifikan.

## B. Agregat (Base, Subbase)

Agregat base dan subbase adalah lapisan material granular yang membentuk bagian penting dari struktur perkerasan jalan. Kedua lapisan ini berfungsi mendukung lapisan perkerasan permukaan, mendistribusikan beban lalu lintas ke tanah dasar (*subgrade*), serta menyediakan drainase untuk menjaga kestabilan struktur perkerasan. Agregat digunakan secara luas dalam konstruksi perkerasan lentur, kaku, maupun komposit. Pemilihan jenis, kualitas, dan ketebalan agregat base dan subbase merupakan faktor kunci dalam menentukan kinerja, umur layanan, serta biaya perkerasan jalan. Menurut Gonçalves dan Margarido (2016), agregat base dan subbase memberikan kontribusi signifikan terhadap kekuatan struktural, stabilitas permukaan, dan ketahanan terhadap deformasi plastis (*rutting*). Oleh karena itu, desain dan spesifikasi agregat harus memperhatikan karakteristik mekanik, fisik, dan lingkungan.

### 1. Fungsi Agregat Base dan Subbase

Agregat base dan subbase memiliki fungsi utama sebagai berikut:

- a. Mendistribusikan Beban Lalu Lintas: Base dan subbase membantu menyebarluaskan beban dari lapisan permukaan ke tanah dasar secara merata, mengurangi konsentrasi tegangan pada subgrade.
- b. Meningkatkan Kapasitas Dukung: Dengan menyediakan lapisan dukungan tambahan, agregat meningkatkan kapasitas dukung struktur perkerasan, terutama pada kondisi subgrade yang lemah.
- c. Memberikan Drainase: Lapisan agregat berperan sebagai saluran drainase untuk mengalirkan air dari permukaan jalan ke sistem

- drainase. Drainase yang baik mengurangi risiko kelembaban berlebih pada subgrade yang dapat merusak struktur perkerasan.
- d. Menambah Ketebalan Efektif Struktur Perkerasan: Lapisan agregat menambah ketebalan struktur perkerasan yang efektif, sehingga mempengaruhi desain ketebalan perkerasan.
  - e. Sebagai Lapisan Kerja: Agregat base dan subbase berfungsi sebagai lapisan kerja untuk konstruksi perkerasan, memudahkan pelaksanaan konstruksi lapisan atas.

## 2. Klasifikasi Agregat Base dan Subbase

Agregat base dan subbase dapat diklasifikasikan berdasarkan jenis material dan fungsi strukturalnya:

- a. Agregat Base: Agregat base merupakan lapisan di bawah lapisan permukaan perkerasan yang langsung menopang lapisan tersebut. Sifatnya harus memiliki kekuatan dan stabilitas tinggi untuk menahan beban lalu lintas. Jenis agregat base:
  - 1) Base Granular Tipe A: Material berbutir dengan kekuatan tinggi, biasanya terdiri dari campuran kerikil, batu pecah, dan pasir.
  - 2) Base Granular Tipe B: Agregat dengan kepadatan lebih rendah, digunakan pada kondisi lalu lintas sedang.
- b. Agregat Subbase: Agregat subbase terletak di bawah lapisan base, berfungsi mendukung base dan mendistribusikan beban ke subgrade. Agregat subbase biasanya memiliki sifat permeabilitas yang baik untuk mendukung drainase. Jenis agregat subbase:
  - 1) Subbase Granular: Campuran pasir dan kerikil dengan ukuran butir tertentu untuk memastikan drainase.
  - 2) Subbase Kualitas Rendah: Digunakan untuk lalu lintas ringan dan kondisi tanah yang relatif baik.

Menurut AASHTO (2015), pemilihan jenis agregat base dan subbase harus mempertimbangkan kondisi lalu lintas, iklim, dan sifat tanah dasar.

## 3. Karakteristik Agregat Base dan Subbase

Karakteristik teknis yang penting untuk agregat base dan subbase meliputi:

- a. Kekuatan Material: Diukur menggunakan uji CBR (*California Bearing Ratio*). Nilai CBR agregat base biasanya lebih tinggi

- dibanding subbase untuk memastikan dukungan optimal terhadap beban lalu lintas.
- b. Ukuran Butir dan Distribusi Ukuran: Distribusi ukuran butir mempengaruhi kepadatan dan stabilitas lapisan agregat. Agregat base umumnya memiliki campuran butiran kasar dan halus untuk mencapai kepadatan optimum.
  - c. Kepadatan dan Porositas: Kepadatan agregat base harus cukup tinggi untuk memberikan kekuatan struktural, sedangkan agregat subbase memerlukan porositas tinggi untuk memastikan drainase yang baik.
  - d. Ketahanan Terhadap Pelapukan: Agregat harus tahan terhadap pelapukan mekanis maupun kimia untuk menjaga stabilitas struktur perkerasan dalam jangka panjang.
  - e. Permeabilitas: Agregat subbase harus memiliki permeabilitas cukup tinggi untuk memungkinkan aliran air ke saluran drainase.

#### 4. Material Agregat yang Umum Digunakan

Beberapa jenis material agregat yang sering digunakan sebagai base dan subbase adalah:

- a. Batu Pecah (*Crushed Stone*): Batu pecah memiliki kekuatan tinggi, bentuk butiran angular yang baik untuk interlock mekanis, sehingga meningkatkan stabilitas lapisan.
- b. Kerikil Alam (*Natural Gravel*): Kerikil memiliki permeabilitas baik, tetapi kekuatan mekaniknya lebih rendah dibanding batu pecah.
- c. Pasir Kasar: Pasir kasar digunakan pada subbase untuk meningkatkan drainase, tetapi memerlukan campuran butiran kasar untuk kekuatan struktural.
- d. Material Daur Ulang (*Recycled Aggregates*): Penggunaan material daur ulang dari beton atau aspal lama menjadi tren terbaru untuk mengurangi biaya konstruksi dan dampak lingkungan.
- e. Material Stabilisasi: Material seperti kapur, semen, atau fly ash ditambahkan pada agregat subbase untuk meningkatkan kekuatan dan stabilitas.

## **5. Peran Agregat dalam Distribusi Beban**

Peran agregat dalam struktur perkerasan jalan sangat penting, khususnya pada lapisan base dan subbase, yang berfungsi sebagai media distribusi beban lalu lintas ke tanah dasar (*subgrade*). Berdasarkan teori *Layered Elastic System* (Huang, 2004), lapisan agregat bekerja sebagai sistem berlapis yang mengurangi tegangan vertikal yang ditransmisikan ke subgrade. Ketebalan dan modulus elastisitas lapisan agregat menjadi faktor penentu utama efektivitas distribusi beban. Semakin tebal dan kaku lapisan agregat, semakin besar kapasitasnya untuk menahan deformasi dan menyalurkan beban lalu lintas secara merata ke lapisan bawah.

Lapisan base berfungsi sebagai lapisan penopang utama pada struktur perkerasan. Agregat pada base harus memiliki kekakuan dan ketahanan terhadap deformasi yang tinggi agar mampu menahan beban dinamis kendaraan secara berulang tanpa mengalami kerusakan dini. Selain itu, lapisan base juga bertugas mendukung lapisan permukaan sehingga permukaan jalan tetap rata dan stabil selama umur layanannya. Ketidakseimbangan dalam ketebalan atau kualitas agregat pada lapisan base dapat menyebabkan konsentrasi tegangan dan mempercepat kerusakan perkerasan seperti retak atau deformasi permanen.

## **6. Drainase pada Base dan Subbase**

Drainase pada lapisan base dan subbase berperan penting dalam mempertahankan kinerja dan umur layanan perkerasan jalan. Lapisan-lapisan ini berfungsi tidak hanya untuk menyalurkan beban lalu lintas tetapi juga sebagai sistem pelindung terhadap kelembaban yang dapat merusak struktur perkerasan. Kelembaban berlebih pada lapisan base dan subbase dapat menurunkan nilai *California Bearing Ratio* (CBR) tanah dasar, sehingga mengurangi kapasitas dukung lapisan agregat dan mempercepat kerusakan perkerasan seperti deformasi permanen (*rutting*) dan retak (*cracking*) (Atmanegara, 2017).

Desain lapisan base dan subbase harus memperhatikan aspek drainase secara komprehensif. Salah satu pendekatan adalah penggunaan material berpori yang memungkinkan air meresap dan dialirkan keluar dari struktur perkerasan. Selain itu, kemiringan permukaan jalan harus dirancang sedemikian rupa sehingga air hujan dapat mengalir secara efektif menuju saluran drainase. Penerapan prinsip ini membantu

menghindari akumulasi air di dalam struktur perkerasan yang berpotensi melemahkan lapisan base dan subbase.

## C. Aspal: Jenis, Sifat, dan Modifikasi

Aspal atau bitumen merupakan bahan pengikat (*binder*) utama pada lapisan perkerasan jalan lentur (*flexible pavement*) dan sebagian lapisan komposit. Aspal merupakan produk hidrokarbon kompleks yang dihasilkan dari penyulingan minyak bumi dan memiliki sifat viskoelastis, yang memungkinkan adaptasi terhadap perubahan suhu dan beban lalu lintas (Huang, 2004). Perkembangan teknologi aspal telah melahirkan berbagai jenis aspal dengan sifat mekanik dan termal yang bervariasi untuk memenuhi kebutuhan desain perkerasan modern. Modifikasi aspal menjadi bagian penting untuk meningkatkan performa jalan, memperpanjang umur layanan, dan mengurangi biaya pemeliharaan.

### 1. Jenis Aspal

Aspal dapat diklasifikasikan berdasarkan sifat fisik dan metode produksinya:

- a. Aspal Penetrometer: Aspal jenis ini diukur berdasarkan penetrasinya pada suhu tertentu (25°C). Nilai penetrasi menunjukkan kekerasan aspal: penetrasi rendah berarti aspal lebih keras, sedangkan penetrasi tinggi berarti lebih lunak.
- b. Aspal Softening Point: Jenis aspal ini diukur berdasarkan titik lunaknya menggunakan metode Ring-and-Ball atau lainnya, yang menunjukkan ketahanan terhadap deformasi pada suhu tinggi.
- c. Aspal Modifikasi: Aspal yang diberi bahan tambahan untuk meningkatkan sifat mekanik dan termal. Modifikasi bisa dilakukan dengan polimer, karet, atau bahan aditif lainnya.
- d. Aspal Oxidized: Aspal yang telah mengalami proses oksidasi untuk meningkatkan viskositas dan kekuannya, biasanya digunakan pada lapisan dasar perkerasan.
- e. Aspal Cutback: Aspal yang dicampur dengan pelarut untuk menurunkan viskositasnya sehingga mudah diaplikasikan pada suhu rendah. Cocok untuk kondisi konstruksi tertentu.

- f. Emulsi Aspal: Aspal yang dicampur dengan air dan emulsi untuk memudahkan aplikasi pada suhu lingkungan, terutama pada perbaikan jalan (*maintenance*) dan pekerjaan lapisan tipis (*surface treatment*).

## 2. Sifat Aspal

Aspal memiliki sifat viskoelastis, artinya menunjukkan sifat elastis pada suhu rendah dan sifat viskoplastis pada suhu tinggi. Sifat utama aspal yang mempengaruhi kinerja perkerasan meliputi:

- a. Viskositas: Viskositas menentukan kemampuan aspal mengalir dan menempel pada agregat selama proses pencampuran dan pemadatan.
- b. Penetrasi: Nilai penetrasi mengindikasikan kekerasan atau kelembutan aspal pada suhu tertentu.
- c. Softening Point: Titik lunak aspal menunjukkan suhu maksimum di mana aspal mempertahankan bentuknya sebelum mengalami deformasi plastis.
- d. Ductility: Ductility mengukur kemampuan aspal untuk meregang sebelum putus, penting untuk menghindari retak pada suhu rendah.
- e. Susut Panas (*Temperature Susceptibility*): Aspal harus memiliki kestabilan suhu yang baik agar tidak terlalu lunak pada suhu tinggi atau terlalu keras pada suhu rendah.
- f. Adhesi: Kemampuan aspal untuk melekat pada agregat penting untuk kekuatan struktural lapisan perkerasan.

## 3. Standar dan Spesifikasi Aspal

Penggunaan aspal diatur dalam standar teknis seperti ASTM, AASHTO, dan SNI. Spesifikasi umum mencakup:

- a. Nilai penetrasi.
- b. Softening point.
- c. Ductility.
- d. Viskositas.
- e. Susut panas.

Menurut AASHTO M 320 (2015), pemilihan jenis aspal harus disesuaikan dengan kondisi iklim, lalu lintas, dan umur layanan yang diinginkan.

#### 4. Modifikasi Aspal

Modifikasi aspal dilakukan untuk meningkatkan sifat mekanik dan ketahanan terhadap kondisi lingkungan. Modifikasi ini bertujuan mengatasi kelemahan aspal murni, seperti susceptibilitas terhadap suhu, deformasi plastis, dan retak.

a. Modifikasi Polimer (*Polymer Modified Bitumen – PMB*)

PMB merupakan jenis aspal yang diberi aditif polimer seperti SBS (*Styrene-Butadiene-Styrene*) atau EVA (*Ethylene-Vinyl Acetate*). Keunggulan PMB meliputi:

- 1) Resistensi tinggi terhadap deformasi plastis (*rutting*).
- 2) Daya tahan retak pada suhu rendah.
- 3) Kestabilan termal yang lebih baik.
- 4) Umur layanan yang lebih panjang.

b. Modifikasi Karet (*Crumb Rubber Modified Asphalt – CRMA*)

CRMA menggunakan karet daur ulang dari ban bekas sebagai modifikasi. Keunggulan:

- 1) Mengurangi polusi limbah karet.
- 2) Meningkatkan ketahanan aus.
- 3) Mengurangi kebisingan lalu lintas.

c. Modifikasi dengan Nano-material

Modifikasi aspal dengan nano-material, seperti nano-silica atau nano-clay, merupakan inovasi signifikan dalam teknologi perkerasan modern. Penambahan nano-material ini mampu meningkatkan adhesi antara butiran agregat dan aspal, sehingga memperkuat kohesi lapisan permukaan jalan. Selain itu, nano-material meningkatkan stabilitas suhu aspal, mengurangi deformasi plastis pada suhu tinggi dan retak pada suhu rendah. Efek ini secara langsung memperpanjang umur layanan perkerasan, mengurangi kebutuhan pemeliharaan, dan meningkatkan efisiensi biaya jangka panjang (Vizzari et al., 2021). Pendekatan ini membuka peluang besar untuk inovasi perkerasan berkelanjutan.

d. Modifikasi dengan Bahan Organik dan Mineral

Modifikasi aspal dengan bahan organik seperti lignin dan bahan mineral seperti fly ash menjadi pendekatan inovatif untuk meningkatkan performa perkerasan sekaligus mendukung keberlanjutan. Lignin, sebagai polimer alami, meningkatkan adhesi aspal dan elastisitasnya, sehingga mengurangi retak dan

deformasi. Sementara fly ash, hasil samping pembakaran batubara, berperan sebagai filler mineral yang meningkatkan stabilitas suhu dan daya dukung struktur perkerasan. Selain meningkatkan sifat mekanik, penggunaan bahan organik dan mineral ini juga ramah lingkungan karena memanfaatkan limbah industri dan mengurangi konsumsi material baru, mendukung konsep ekonomi sirkular dalam teknologi perkerasan jalan.

## 5. Efek Modifikasi Aspal terhadap Kinerja Perkerasan

Modifikasi aspal terbukti meningkatkan kinerja perkerasan dalam kondisi beban lalu lintas tinggi dan kondisi iklim ekstrem:

### a. Ketahanan terhadap Rutting

Aspal termodifikasi memiliki ketahanan terhadap rutting yang lebih baik dibandingkan aspal konvensional karena sifat viskoelastisnya yang ditingkatkan. Penambahan bahan modifikasi seperti polimer, nano-material, atau bahan organik mengubah struktur molekul aspal sehingga meningkatkan modulus elastisitas dan stabilitas suhu. Hal ini membuat lapisan permukaan jalan mampu menahan deformasi plastis ketika menerima beban lalu lintas pada suhu tinggi, seperti yang terjadi pada musim panas atau daerah beriklim tropis. Peningkatan ketahanan terhadap rutting berkontribusi langsung pada umur layanan perkerasan. Deformasi plastis yang kurang berarti permukaan jalan tetap lebih rata dalam jangka waktu lebih lama, sehingga mengurangi kebutuhan pemeliharaan dan biaya rehabilitasi. Efek ini menjadikan aspal termodifikasi pilihan unggul untuk jalan dengan volume lalu lintas tinggi dan kondisi iklim ekstrem, yang menuntut perkerasan memiliki ketahanan mekanik optimal.

### b. Ketahanan terhadap Retak pada Suhu Rendah

Modifikasi aspal dengan polimer dan aditif tertentu meningkatkan ductility (kemampuan deformasi) material, sehingga perkerasan menjadi lebih fleksibel pada suhu rendah. Pada kondisi suhu dingin, aspal konvensional cenderung mengerut dan menjadi rapuh, yang meningkatkan risiko retak termal (*thermal cracking*). Penambahan polimer seperti *styrene-butadiene-styrene* (SBS) atau bahan organik dapat mengubah

sifat termomekanik aspal sehingga mempertahankan elastisitasnya pada suhu rendah.

Peningkatan ductility ini membantu menyerap tegangan tarik yang terjadi akibat kontraksi termal, sehingga mengurangi peluang terbentuknya retakan pada lapisan permukaan. Akibatnya, umur layanan perkerasan meningkat dan biaya pemeliharaan dapat ditekan. Efek ini sangat penting untuk daerah dengan variasi suhu ekstrem atau jalan yang mengalami pendinginan drastis, karena dapat mempertahankan integritas struktural perkerasan dalam jangka panjang.

c. Umur Layanan Lebih Panjang

Modifikasi aspal dengan bahan aditif seperti polimer, nano-material, atau bahan organik dapat secara signifikan memperlambat proses oksidasi dan penuaan aspal. Proses oksidasi pada aspal menyebabkan material menjadi lebih kaku dan rapuh seiring waktu, sehingga meningkatkan risiko retak dan kerusakan pada lapisan perkerasan (Jamshidi & White, 2019). Modifikasi meningkatkan stabilitas termal dan elastisitas aspal, sehingga memperlambat degradasi material akibat paparan sinar matahari, oksigen, dan perubahan suhu. Dengan sifat yang lebih tahan terhadap penuaan, umur layanan lapisan perkerasan menjadi lebih panjang. Hal ini berarti frekuensi pemeliharaan dan rehabilitasi dapat dikurangi, sehingga menghemat biaya operasional jalan dalam jangka panjang.

d. Peningkatan Adhesi

Aditif polimer dan nano-material yang digunakan dalam modifikasi aspal memiliki peran penting dalam meningkatkan adhesi antara aspal dan agregat. Adhesi yang baik memastikan ikatan yang kuat pada lapisan perkerasan, sehingga mengurangi risiko terjadinya stripping yaitu terlepasnya lapisan aspal dari agregat akibat penetrasi air atau kelembaban. Stripping dapat mempercepat kerusakan perkerasan seperti lubang kecil, retak, dan deformasi permanen. Peningkatan adhesi tidak hanya memperpanjang umur layanan perkerasan tetapi juga meningkatkan kinerja struktural jalan secara keseluruhan.

## D. Semen dan Beton untuk Perkerasan Kaku

Perkerasan kaku (*rigid pavement*) merupakan salah satu jenis struktur jalan yang menggunakan beton semen sebagai lapisan permukaan yang menyalurkan beban lalu lintas ke tanah dasar. Beton semen menawarkan kekakuan tinggi yang dapat mendistribusikan beban lalu lintas ke area yang lebih luas, sehingga mengurangi tekanan pada subgrade dibandingkan perkerasan lentur. Semen adalah bahan pengikat utama dalam pembuatan beton perkerasan. Beton sendiri adalah campuran semen, agregat kasar dan halus, air, serta aditif yang dirancang untuk memenuhi persyaratan kekuatan, daya tahan, dan performa jalan. Perkembangan teknologi beton modern telah menghasilkan variasi semen dan beton yang memiliki sifat khusus untuk meningkatkan kinerja perkerasan kaku (Hall & Schwartz, 2018).

### 1. Peran Semen dalam Beton Perkerasan

Semen bertindak sebagai bahan pengikat yang mengikat agregat menjadi struktur solid dan memberikan kekuatan tekan pada beton. Dalam perkerasan kaku, semen berfungsi untuk:

- a. Menghasilkan Kekuatan Tinggi: Kekuatan beton sangat bergantung pada kualitas semen dan komposisi campuran beton. Semen berkualitas tinggi dapat menghasilkan beton dengan kekuatan tekan yang tinggi, yang penting untuk menahan beban lalu lintas berat.
- b. Memberikan Kekakuan Struktural: Kekakuan beton perkerasan memungkinkannya untuk menyalurkan beban ke area yang luas pada subgrade.
- c. Menjamin Ketahanan terhadap Degradasi Lingkungan: Semen membantu beton tahan terhadap perubahan suhu, kelembaban, dan efek kimia dari lingkungan, seperti sulfat dan klorida.

### 2. Jenis Semen untuk Perkerasan Kaku

Beberapa jenis semen yang umum digunakan dalam perkerasan kaku meliputi:

- a. *Portland Cement* (OPC): Semen Portland adalah jenis semen yang paling banyak digunakan untuk konstruksi jalan. Memiliki waktu pengerasan yang sesuai dan menghasilkan kekuatan tekan tinggi

- b. *Sulfate Resistant Cement* (SRC): Semen ini digunakan pada daerah dengan tanah atau air yang mengandung sulfat tinggi untuk mencegah kerusakan beton akibat reaksi sulfat (*sulfate attack*).
- c. *Blended Cement*: Merupakan campuran semen Portland dengan bahan tambahan seperti fly ash, slag, atau silica fume. Tujuannya adalah meningkatkan ketahanan beton, mengurangi panas hidrasi, dan meningkatkan umur layanan.
- d. *High Early Strength Cement*: Semen ini menghasilkan kekuatan awal yang tinggi, berguna untuk proyek yang memerlukan waktu pengerasan cepat seperti perkerasan jalan di daerah padat lalu lintas.

### 3. Beton untuk Perkerasan Kaku

Beton perkerasan adalah beton berkualitas tinggi yang dirancang untuk menahan beban lalu lintas, iklim, dan kondisi lingkungan yang keras. Komposisi beton perkerasan meliputi semen, agregat, air, dan aditif.

- a. Agregat dalam Beton Perkerasan: Agregat kasar dan halus digunakan untuk memberikan volume, kekakuan, dan stabilitas beton. Kualitas agregat sangat menentukan kinerja beton, terutama dalam hal kekuatan tekan, modulus elastisitas, dan tahan aus.
- b. Air: Kandungan air yang sesuai sangat penting untuk hidrasi semen dan pembentukan kekuatan beton. Rasio air terhadap semen (*water-cement ratio*) harus dikontrol ketat untuk mendapatkan beton dengan kekuatan optimal.
- c. Aditif Beton: Aditif digunakan untuk meningkatkan sifat beton, seperti *workability*, ketahanan terhadap retak, dan daya tahan terhadap kondisi lingkungan ekstrem. Jenis aditif yang umum digunakan:
  - 1) Superplasticizers untuk meningkatkan *workability*.
  - 2) Air-entraining agents untuk meningkatkan ketahanan terhadap siklus pembekuan-pencairan.
  - 3) Retarders dan accelerators untuk mengatur waktu pengerasan beton.

Menurut AASHTO (2015), penggunaan aditif harus disesuaikan dengan kondisi lingkungan dan kebutuhan teknis perkerasan.

#### **4. Sifat Beton Perkerasan Kaku**

Beberapa sifat beton perkerasan yang perlu diperhatikan meliputi:

- a. Kekuatan Tekan: Beton perkerasan harus memiliki kekuatan tekan tinggi (umumnya  $>30$  MPa) untuk menahan beban lalu lintas.
- b. Modulus Elastisitas: Modulus elastisitas beton mempengaruhi kemampuannya menyalurkan beban. Beton dengan modulus elastisitas tinggi dapat mendistribusikan beban lebih baik pada subgrade.
- c. Ketahanan Retak: Retak pada beton perkerasan dapat disebabkan oleh siklus pembekuan-pencairan, muatan berulang, atau penyusutan hidrasi semen. Pemilihan semen dan aditif yang tepat dapat mengurangi retak.
- d. Durabilitas: Beton perkerasan harus tahan terhadap degradasi akibat kondisi lingkungan, termasuk serangan sulfat, klorida, abrasi, dan siklus pembekuan-pencairan.
- e. Permeabilitas: Permeabilitas beton harus rendah untuk menghindari penetrasi air yang dapat menyebabkan kerusakan pada lapisan perkerasan dan subgrade.

#### **5. Modifikasi Beton Perkerasan**

Pengembangan teknologi beton modern telah menghasilkan berbagai metode modifikasi untuk meningkatkan kinerja perkerasan kaku:

- a. *High Performance Concrete (HPC)*

*High Performance Concrete (HPC)* merupakan inovasi dalam teknologi beton yang dirancang untuk memberikan kekuatan tekan tinggi, modulus elastisitas yang besar, serta durabilitas superior dibandingkan beton konvensional. HPC memiliki komposisi khusus yang mencakup penggunaan agregat berkualitas tinggi, semen portland khusus, aditif mineral, dan bahan kimia modifikasi. Sifat ini membuat HPC mampu menahan beban lalu lintas berat dan kondisi iklim ekstrem seperti siklus pembekuan-pencairan, kelembaban tinggi, atau suhu tinggi (Roja et al., 2021).

b. *Roller Compacted Concrete (RCC)*

*Roller Compacted Concrete (RCC)* adalah jenis beton yang dipadatkan menggunakan roller, menghasilkan kepadatan tinggi dan kekakuan yang signifikan. Proses konstruksinya mirip dengan pembangunan jalan beraspal, namun RCC menggunakan campuran beton kering dengan sedikit air sehingga memungkinkan pemasangan cepat. Karakteristik ini membuat RCC memiliki kekakuan tinggi, daya dukung yang baik, serta umur layanan yang panjang. RCC banyak digunakan pada proyek infrastruktur seperti jalan tol, dermaga, dan area industri yang memerlukan perkerasan kuat dan tahan terhadap beban tinggi.

c. *Fiber Reinforced Concrete (FRC)*

*Fiber Reinforced Concrete (FRC)* adalah beton yang diperkuat dengan penambahan serat seperti steel fiber, polypropylene fiber, atau glass fiber, yang berfungsi meningkatkan sifat mekanik beton. Penambahan serat ini membantu menghambat pertumbuhan retak, meningkatkan ketahanan terhadap deformasi, serta memperbaiki daya tahan beton terhadap beban tinggi dan kondisi lingkungan ekstrem. FRC menjadi pilihan ideal untuk perkerasan jalan yang menanggung lalu lintas berat, seperti jalan tol, dermaga, dan landasan pacu bandara, karena kemampuannya dalam mempertahankan integritas struktural di bawah beban siklik dan kondisi iklim yang berubah-ubah.

d. *Self-Consolidating Concrete (SCC)*

*Self-Consolidating Concrete (SCC)* adalah beton inovatif yang memiliki kemampuan mengalir dan mengisi cetakan secara mandiri tanpa memerlukan pemasangan mekanis. Keunggulan utama SCC terletak pada sifat alirnya yang tinggi, sehingga memudahkan pemasangan beton pada area konstruksi yang sulit dijangkau atau memiliki ruang terbatas. Teknologi ini mengurangi kebutuhan tenaga kerja dan waktu konstruksi, serta meminimalkan risiko cacat pada beton akibat pemasangan yang tidak merata.

e. *Geopolymer Concrete*

*Geopolymer Concrete (GPC)* adalah inovasi beton ramah lingkungan yang menggunakan bahan pengikat alternatif selain semen Portland, seperti fly ash, slag, atau metakaolin. Penggunaan bahan tersebut tidak hanya mengurangi konsumsi

semen Portland tetapi juga secara signifikan menurunkan emisi CO<sub>2</sub> selama proses produksi, sehingga mendukung pembangunan berkelanjutan (Thom, 2024). Selain itu, GPC memiliki sifat mekanik yang unggul, termasuk kekuatan tekan tinggi, ketahanan terhadap korosi, dan durabilitas yang lebih baik dibanding beton konvensional.

## E. Material Inovatif: Geosintetik, RAP, dan Material Hijau

Teknologi material perkerasan jalan telah berkembang pesat dalam beberapa dekade terakhir. Permintaan akan konstruksi jalan yang lebih efisien, tahan lama, dan ramah lingkungan mendorong penggunaan material inovatif. Material inovatif seperti geosintetik, *Reclaimed Asphalt Pavement* (RAP), dan material hijau menawarkan solusi teknis dan lingkungan yang signifikan. Material inovatif ini tidak hanya meningkatkan kinerja perkerasan jalan tetapi juga mengurangi dampak lingkungan, penggunaan sumber daya alam, dan biaya konstruksi serta pemeliharaan. Studi terbaru menunjukkan bahwa penggunaan material inovatif memiliki potensi besar dalam mendukung konsep Sustainable Pavement (Papagiannakis & Masad, 2024).

### 1. Geosintetik untuk Perkerasan Jalan

Geosintetik adalah bahan sintetis yang digunakan dalam aplikasi geoteknik dan konstruksi jalan, terbuat dari polimer seperti polipropilena, poliester, polietilena, atau polivinil klorida (Koerner, 2012). Geosintetik meliputi geotekstil, geomembran, geogrid, geonet, dan geocomposite, masing-masing memiliki fungsi spesifik dalam konstruksi jalan.

#### a. Keunggulan Geosintetik

- 1) Meningkatkan umur layanan perkerasan.
- 2) Mengurangi ketebalan lapisan agregat base dan subbase.
- 3) Mengurangi biaya konstruksi dan pemeliharaan.
- 4) Meningkatkan stabilitas struktural jalan pada kondisi tanah lunak.

Integrasi geosintetik dalam desain perkerasan memberikan efisiensi struktural yang signifikan dan merupakan solusi berkelanjutan dalam industri konstruksi jalan.

- b. Tantangan Penggunaan Geosintetik
  - 1) Biaya material dan pemasangan yang relatif tinggi.
  - 2) Ketahanan terhadap UV dan bahan kimia tertentu.
  - 3) Keterbatasan standar desain yang berlaku di beberapa negara.

- c. Jenis Geosintetik dan Aplikasinya

- 1) Geotextile

Geotextile adalah jenis geosintetik yang banyak digunakan dalam konstruksi perkerasan jalan untuk fungsi pemisahan dan filtrasi. Geotextile dipasang di antara lapisan base atau subbase dan tanah dasar untuk mencegah pencampuran material agregat dengan tanah dasar, sehingga menjaga kestabilan struktur perkerasan. Selain itu, geotextile berfungsi sebagai media filtrasi yang memungkinkan aliran air keluar sambil menahan partikel tanah, sehingga membantu menjaga drainase lapisan perkerasan. Penggunaan geotextile meningkatkan umur layanan jalan, mengurangi deformasi, serta mengoptimalkan kinerja struktur perkerasan secara keseluruhan.

- 2) Geogrid

Geogrid adalah jenis geosintetik yang dirancang untuk memperkuat lapisan agregat pada struktur perkerasan jalan. Dengan pola anyaman atau struktur terbuka, geogrid membantu mendistribusikan beban lalu lintas secara merata ke lapisan bawah, sehingga meningkatkan kapasitas dukung perkerasan. Selain itu, geogrid efektif dalam mengurangi deformasi plastis (*rutting*) dengan membatasi pergerakan lateral butiran agregat di bawah beban. Penerapan geogrid pada lapisan base atau subbase terbukti memperpanjang umur layanan jalan, meningkatkan kestabilan struktural, dan mengurangi kebutuhan pemeliharaan, sehingga menjadi solusi ekonomis dan teknis dalam desain perkerasan modern.

- 3) Geomembrane

Geomembrane adalah jenis geosintetik berupa lembaran sintetis impermeabel yang berfungsi sebagai lapisan penghalang dalam struktur perkerasan jalan. Fungsinya utama adalah mencegah penetrasi air ke lapisan perkerasan, terutama pada lapisan base dan subbase, sehingga menjaga

kestabilan struktur jalan dan mencegah penurunan kapasitas dukung tanah dasar. Pemasangan geomembrane efektif dalam mengatasi masalah drainase, mengurangi kerusakan akibat kelembaban berlebih, dan memperpanjang umur layanan perkerasan. Dengan karakteristik tahan lama dan kedap air, geomembrane menjadi solusi penting dalam desain perkerasan modern yang menuntut ketahanan terhadap kondisi lingkungan yang variatif.

#### 4) Geocomposite

Geocomposite adalah material geosintetik yang menggabungkan berbagai fungsi, seperti drainase, filtrasi, dan perlindungan struktural, dalam satu produk. Biasanya terdiri dari lapisan geotextile yang dipadukan dengan inti drainase seperti geonet atau geomembrane. Dalam perkerasan jalan, geocomposite digunakan untuk meningkatkan daya tahan struktur dengan memastikan aliran air yang efisien, mencegah akumulasi kelembaban, serta melindungi lapisan base dan subbase dari kontaminasi partikel halus. Penerapan geocomposite dapat mengurangi risiko deformasi dan kerusakan akibat kelembaban berlebih, sehingga memperpanjang umur layanan jalan dan mengoptimalkan biaya pemeliharaan jangka panjang.

## 2. *Reclaimed Asphalt Pavement (RAP)*

RAP adalah material aspal dan agregat yang dihasilkan dari proses penggalian atau peremajaan perkerasan jalan lama. Material ini dapat digunakan kembali sebagai bahan campuran dalam perkerasan baru, baik sebagai agregat pengisi maupun bahan pengikat.

### a. Metode Penggunaan RAP

Penggunaan RAP dapat dilakukan dalam berbagai metode:

- 1) *Hot Mix Asphalt (HMA)* dengan RAP: mencampurkan RAP dengan aspal baru pada suhu tinggi.
- 2) *Warm Mix Asphalt (WMA)* dengan RAP: mencampurkan RAP pada suhu lebih rendah, mengurangi konsumsi energi.
- 3) *Full Depth Reclamation (FDR)*: memanfaatkan RAP dari lapisan perkerasan lama secara penuh sebagai lapisan base atau subbase baru.

b. Pengaruh RAP terhadap Kinerja Perkerasan

Penggunaan *Reclaimed Asphalt Pavement* (RAP) dalam campuran perkerasan telah terbukti memberikan keuntungan signifikan terhadap kinerja jalan. RAP mengandung material aspal dan agregat yang masih memiliki sifat mekanik baik, sehingga dapat meningkatkan stabilitas campuran aspal baru. Namun, karakteristik RAP yang bervariasi memerlukan penyesuaian kadar aspal baru untuk memastikan homogenitas campuran dan mempertahankan kualitas perkerasan. Teknologi modifikasi, seperti penggunaan polimer atau bahan tambahan lain, juga diperlukan untuk menjaga daya dukung dan ketahanan terhadap deformasi.

c. Keuntungan Penggunaan RAP

- 1) Mengurangi kebutuhan material baru (agregat dan aspal).
- 2) Mengurangi dampak lingkungan dari penambangan agregat dan produksi aspal baru.
- 3) Mengurangi biaya konstruksi dan pemeliharaan.

d. Tantangan Penggunaan RAP

- 1) Variasi kualitas material RAP.
- 2) Kontrol kadar aspal dalam RAP.
- 3) Perlunya peralatan khusus untuk pengolahan dan pencampuran RAP.

### 3. Material Hijau untuk Perkerasan Jalan

Material hijau adalah bahan konstruksi yang menggunakan sumber daya berkelanjutan atau limbah untuk mengurangi dampak lingkungan konstruksi jalan. Material ini mencakup penggunaan bahan daur ulang, bahan organik, dan bahan alternatif non-fosil.

a. Contoh Material Hijau

- 1) Limbah plastik daur ulang sebagai modifikasi aspal (*Plastic Modified Asphalt*).
- 2) Fly ash dan slag sebagai substitusi semen dalam beton perkerasan kaku.
- 3) Bio-binders seperti lignin dari limbah pertanian untuk modifikasi aspal.
- 4) Material alami seperti vulkanik atau tanah liat sebagai agregat base atau subbase.

b. Teknologi Pengolahan Material Hijau

Pengolahan material hijau untuk perkerasan jalan melibatkan penerapan teknologi inovatif yang mampu meningkatkan kualitas dan kinerja material sambil mengurangi dampak lingkungan. Teknologi daur ulang (*recycling technology*) memungkinkan penggunaan kembali material bekas seperti aspal lama dan agregat dari konstruksi sebelumnya, sehingga mengurangi kebutuhan bahan baru dan limbah konstruksi. Pendekatan ini tidak hanya ramah lingkungan tetapi juga ekonomis, karena dapat menekan biaya material dan konstruksi. Chemical treatment digunakan untuk memperbaiki sifat mekanik material hijau, seperti meningkatkan daya dukung, ketahanan aus, dan stabilitas termal. Penggunaan nano-materials, seperti nano-silica atau nano-clay, juga semakin berkembang untuk meningkatkan adhesi, ketahanan retak, dan umur layanan perkerasan pada skala mikro. Integrasi teknologi ini menciptakan material hijau dengan performa tinggi yang sesuai untuk memenuhi tuntutan konstruksi jalan modern sekaligus mendukung prinsip keberlanjutan.

c. Keunggulan Material Hijau

- 1) Mengurangi penggunaan bahan baku alam.
- 2) Mengurangi emisi karbon dan limbah konstruksi.
- 3) Meningkatkan umur layanan perkerasan.
- 4) Mendukung konsep Circular Economy dalam konstruksi jalan.

d. Tantangan Penggunaan Material Hijau

- 1) Variasi sifat material hijau.
- 2) Standarisasi spesifikasi material hijau.
- 3) Biaya awal teknologi pengolahan yang tinggi.





# BAB V

## PERANCANGAN

# PERKERASAN LENTUR

---

Perancangan perkerasan lentur (*flexible pavement*) adalah salah satu aspek penting dalam pembangunan jalan raya yang bertujuan menghasilkan struktur jalan yang aman, efisien, dan tahan lama. Perkerasan lentur terdiri dari beberapa lapisan material yang berfungsi menyalurkan beban lalu lintas ke tanah dasar. Proses perancangan harus memperhatikan beban lalu lintas, karakteristik material, kondisi tanah dasar, dan faktor lingkungan. Bab ini menegaskan bahwa perancangan perkerasan lentur bukan hanya sekadar perhitungan teknis, tetapi juga memerlukan pendekatan ilmiah yang mengintegrasikan teori dan praktik konstruksi jalan.

Bab ini membahas berbagai metode perancangan perkerasan lentur, termasuk pendekatan empiris dan mekanis-empiris yang digunakan secara global, seperti Metode AASHTO 1993 dan Manual Desain Perkerasan Jalan (MDPJ) di Indonesia. Pembahasan mencakup analisis beban lalu lintas, perhitungan tebal lapisan perkerasan, serta evaluasi performa struktur jalan. Bab ini juga membahas prinsip-prinsip desain yang mempertimbangkan faktor keselamatan, kenyamanan pengguna jalan, efisiensi biaya, dan umur layanan perkerasan. Pemahaman menyeluruh terhadap metode perancangan ini sangat penting untuk menghasilkan struktur jalan yang optimal dan berkelanjutan.

### A. Pendekatan Desain Empiris vs Mekanis-Empiris

Perancangan perkerasan lentur (*flexible pavement*) merupakan proses kritis dalam rekayasa transportasi yang bertujuan menentukan ketebalan lapisan perkerasan yang optimal untuk menahan beban lalu

lintas sepanjang umur layanan yang direncanakan. Pendekatan desain perkerasan lentur telah berevolusi dari metode empiris murni menjadi metode mekanis-empiris yang lebih komprehensif, mengintegrasikan analisis mekanika bahan dan data empiris lapangan (AASHTO, 2015). Pendekatan empiris didasarkan pada pengalaman dan data historis dari konstruksi jalan, sedangkan pendekatan mekanis-empiris menggunakan model mekanis untuk menghitung respon struktur perkerasan terhadap beban lalu lintas, yang kemudian dikalibrasi dengan data empiris.

## 1. Pendekatan Desain Empiris

Pendekatan desain empiris adalah metode yang menggunakan data historis dari proyek jalan sebelumnya untuk menentukan ketebalan perkerasan dan material yang dibutuhkan. Data tersebut biasanya berasal dari pengujian lapangan, observasi kondisi jalan, dan catatan kerusakan selama umur layanan (Huang, 2004). Desain empiris didasarkan pada hubungan antara ketebalan perkerasan, beban lalu lintas, kondisi tanah dasar, dan umur layanan yang terbukti dari pengalaman konstruksi jalan sebelumnya. Metode ini tidak mempertimbangkan mekanika internal struktur perkerasan secara mendalam, melainkan mengacu pada standar dan panduan yang telah terbukti. Beberapa metode desain empiris yang terkenal:

- a. AASHTO Road Test Method (1958–1960) – merupakan salah satu metode desain empiris paling berpengaruh.
- b. Metode desain jalan di beberapa negara yang masih mengacu pada panduan empiris berbasis pengalaman.

## 2. Pendekatan Desain Mekanis-Empiris

Pendekatan mekanis-empiris adalah metode desain perkerasan yang menggabungkan analisis mekanika struktur perkerasan dengan data empiris dari lapangan. Pendekatan ini memungkinkan perhitungan respon struktural perkerasan terhadap beban lalu lintas, yang kemudian divalidasi menggunakan data empiris untuk meningkatkan akurasi desain (AASHTO, 2015). Desain mekanis-empiris didasarkan pada teori elastisitas dan plastisitas, serta model lapisan elastis (*layered elastic system*) yang memperhitungkan interaksi antara lapisan perkerasan dan subgrade. Faktor-faktor yang dianalisis meliputi:

- a. Tegangan dan regangan dalam lapisan perkerasan.
- b. Kedalaman maksimum tegangan tekan (*compressive stress*).

- c. Kedalaman maksimum regangan tarik (*tensile strain*) yang menjadi pemicu kerusakan retak.
- d. Umur layanan yang diinginkan berdasarkan jumlah siklus lalu lintas.

Proses desain mekanis-empiris

- 1) Menentukan kondisi lalu lintas dan beban (misalnya ESAL — Equivalent Single Axle Load).
- 2) Menentukan sifat material lapisan perkerasan (modulus elastisitas, Poisson's ratio).
- 3) Menggunakan model lapisan elastis untuk menghitung respon tegangan/regangan.
- 4) Menggunakan hubungan empiris antara regangan dan umur layanan untuk menentukan ketebalan lapisan.

Contoh metode desain mekanis-empiris:

- 1) AASHTO *Mechanistic-Empirical Pavement Design Guide* (MEPDG).
- 2) CalME Design Method di California.
- 3) Software seperti KENPAVE, EVERCALC yang menerapkan konsep ini.

### 3. Perbandingan Desain Empiris dan Mekanis-Empiris

Tabel 2. Perbandingan Desain Empiris dan Mekanis-Empiris

Aspek	Desain Empiris	Desain Mekanis-Empiris
Basis	Data historis proyek sebelumnya	Analisis mekanika struktur + data empiris
Kompleksitas	Rendah	Tinggi
Fleksibilitas	Terbatas	Tinggi
Akurasi Prediksi	Terbatas pada kondisi serupa	Tinggi karena mempertimbangkan variasi material dan kondisi lalu lintas
Kebutuhan Data	Minimal	Data material, lalu lintas, iklim yang rinci
Waktu & Biaya Desain	Cepat, biaya rendah	Lebih lama, biaya lebih tinggi
Kelebihan	Sederhana, terbukti efektif	Presisi tinggi, adaptif pada kondisi spesifik

Kekurangan	Kurang fleksibel, rentan kesalahan	Kompleks, membutuhkan data dan tenaga ahli
------------	------------------------------------	--

#### 4. Studi Kasus dan Implementasi

##### a. Desain Empiris di Negara Berkembang

Di banyak negara berkembang, penerapan desain perkerasan jalan masih mengandalkan pendekatan empiris karena keterbatasan infrastruktur penelitian, data lalu lintas, maupun perangkat analisis canggih. Metode desain empiris relatif sederhana dan hanya membutuhkan parameter dasar seperti nilai CBR tanah dasar, beban lalu lintas perkiraan, dan kondisi iklim setempat. Kesederhanaan ini membuatnya lebih praktis dan efisien digunakan, terutama pada wilayah dengan kapasitas teknis dan sumber daya manusia yang masih terbatas.

Pendekatan empiris dianggap lebih sesuai untuk pembangunan jalan di daerah pedesaan atau perkotaan kecil yang lalu lintasnya tidak terlalu tinggi. Walaupun metode ini kurang akurat dalam memprediksi kerusakan jangka panjang dibandingkan metode mekanistik-empiris, desain empiris tetap memberikan solusi yang terjangkau dan aplikatif. Dengan demikian, banyak negara berkembang masih menjadikannya sebagai pilihan utama, sambil secara bertahap mengadopsi metode desain yang lebih modern.

##### b. Desain Mekanis-Empiris di Negara Maju

Negara-negara maju seperti Amerika Serikat, Kanada, dan Australia telah mengadopsi pendekatan desain mekanis-empiris melalui *Mechanistic-Empirical Pavement Design Guide* (MEPDG). Pendekatan ini memanfaatkan data lalu lintas yang detail, karakteristik material, serta kondisi iklim yang bervariasi untuk menghasilkan prediksi kinerja perkerasan yang lebih akurat. Dengan dukungan perangkat lunak khusus, analisis dapat mencakup mekanisme kerusakan utama seperti fatigue dan rutting, sehingga desain perkerasan dapat disesuaikan dengan kondisi nyata di lapangan.

Pendekatan mekanis-empiris juga dinilai lebih efisien dari sisi biaya jangka panjang. Hal ini karena MEPDG memungkinkan rekayasa desain yang mampu meminimalkan risiko kegagalan dini dan memperpanjang umur layanan jalan. Dengan

kemampuan menyesuaikan perkerasan terhadap beban lalu lintas yang terus meningkat serta variabilitas iklim, metode ini menjadi standar utama dalam pembangunan infrastruktur jalan modern di negara maju (AASHTO, 2015).

## 5. Integrasi Pendekatan Empiris dan Mekanis-Empiris

Integrasi pendekatan empiris dan mekanis-empiris menjadi tren penting dalam desain perkerasan modern, terutama karena masing-masing metode memiliki keunggulan yang saling melengkapi. Desain mekanis-empiris memberikan kerangka perhitungan yang kuat berbasis teori mekanika, seperti analisis regangan, tegangan, serta deformasi pada lapisan perkerasan. Namun, hasil perhitungan teoritis tersebut tetap membutuhkan validasi dengan data empiris yang diperoleh dari uji lapangan maupun pengalaman historis, agar hasil desain dapat mencerminkan kondisi nyata di lapangan (Magdy et al., 2024).

Keunggulan integrasi ini terlihat pada efisiensi desain, karena metode mekanis-empiris mampu memberikan prediksi umur layanan berdasarkan mekanisme kerusakan utama seperti fatigue dan rutting, sementara data empiris membantu menyesuaikan hasil prediksi dengan variabilitas lokal, misalnya perbedaan iklim tropis, subtropis, atau dingin. Dengan demikian, desain perkerasan tidak hanya lebih presisi secara teknis, tetapi juga adaptif terhadap kondisi geografis dan lingkungan spesifik. Hal ini sangat penting di negara berkembang, di mana keterbatasan data detail dapat diimbangi dengan pengalaman empiris yang luas dari proyek sebelumnya.

### B. Metode AASHTO 1993

Metode AASHTO 1993 merupakan pendekatan desain perkerasan jalan yang berbasis pada analisis empiris dan statistik, yang dikembangkan oleh *American Association of State Highway and Transportation Officials* (AASHTO). Metode ini merupakan evolusi dari metode desain AASHTO sebelumnya (AASHTO 1961) dan didasarkan pada hasil AASHO Road Test yang dilakukan pada akhir 1950-an hingga awal 1960-an. Metode ini banyak digunakan secara internasional sebagai panduan standar dalam desain perkerasan lentur (*flexible pavement*) hingga era modern, sebelum pengembangan metode mekanis-empiris (*Mechanistic-Empirical Pavement Design Guide – MEPDG*). Meskipun

telah digantikan di banyak negara oleh MEPDG, metode AASHTO 1993 tetap relevan karena kesederhanaannya, kemudahan penerapan, dan dasar empiris yang kuat.

## 1. Dasar Teori Metode AASHTO 1993

Metode AASHTO 1993 didasarkan pada analisis regresi terhadap data AASHO Road Test, yang menghasilkan persamaan desain untuk menghitung ketebalan perkerasan lentur berdasarkan:

- a. Jumlah beban lalu lintas (*traffic loading*), diukur dalam *Equivalent Single Axle Load* (ESAL).
- b. Kualitas tanah dasar (*subgrade support*), diukur menggunakan *Soil Support Value* (SSV) atau Resilient Modulus.
- c. Faktor lingkungan dan iklim.
- d. Kriteria umur layanan perkerasan (*design life*).

Persamaan dasar metode AASHTO 1993 adalah:

$$D_f = Z_r \cdot S_N \cdot \log(E) + \text{Constant}$$

Namun, bentuk yang lebih umum digunakan adalah:

$$SN = a_1 D_1 + a_2 D_2 + \dots + a_n D_n$$

di mana:

- $SN$  = Structural Number
- $a_i$  = Struktur koefisien lapisan
- $D_i$  = Ketebalan lapisan i
- $E$  = Faktor yang terkait jumlah beban dan kondisi lingkungan

AASHTO (1993) mengembangkan persamaan desain yang spesifik seperti berikut:

$$SN = \frac{Z_r \cdot S_0 + 9.36 \cdot \log_{10}(W_{18}) - 2.32}{0.40 + 1094 \cdot \log_{10}(MR)}$$

di mana:

- $Z_r$  = Nilai reliabilitas
- $S_0$  = Standard deviation jalan
- $W_{18}$  = Jumlah total ESAL pada umur desain 18 tahun
- $MR$  = Modulus Resilien tanah dasar

## 2. Komponen Utama Metode AASHTO 1993

- a. *Structural Number* (SN): SN adalah nilai representatif dari kekuatan struktural perkerasan, dihitung dari kombinasi ketebalan lapisan dan koefisien material.

$$SN = a_1D_1 + a_2D_2 + a_3D_3 + \dots$$

Tabel koefisien lapisan (a) dari AASHTO dapat dilihat pada Tabel 3.

Lapisan	Koefisien a
Surface course	0.44 – 0.44
Base course	0.11 – 0.14
Subbase course	0.10 – 0.12

Catatan: Nilai a ditentukan berdasarkan material dan kondisi perkerasan (AASHTO, 1993).

- b. Jumlah Beban Lalu Lintas (W18): W18 adalah jumlah beban sumbu tunggal ekuivalen (ESAL) yang direncanakan selama umur desain perkerasan (biasanya 18 tahun). ESAL dihitung berdasarkan data lalu lintas aktual dan faktor pembobot.
- c. Nilai Reliabilitas (Zr): Nilai Zr adalah faktor statistik yang mewakili kemungkinan kegagalan perkerasan sebelum umur desain tercapai. Tingkat reliabilitas ditentukan berdasarkan kelas jalan, lalu lintas, dan kepentingan strategis jalan.
- d. Modulus Resilien Tanah Dasar (MR): MR adalah ukuran kekuatan elastisitas tanah dasar, diukur melalui uji laboratorium (*resilient modulus test*) atau metode empiris lainnya.
- e. Faktor Lingkungan (So): Faktor lingkungan mempertimbangkan kondisi iklim seperti suhu, curah hujan, dan siklus pembekuan-pencairan yang memengaruhi kinerja perkerasan.

## 3. Proses Perancangan Perkerasan Lentur dengan Metode AASHTO 1993

Berikut adalah tahapan utama dalam perancangan perkerasan lentur menggunakan metode AASHTO 1993:

- a. Menentukan Parameter Desain
  - 1) Umur desain perkerasan (biasanya 20 tahun).
  - 2) Kelas jalan dan nilai reliabilitas (Zr).
  - 3) Faktor lingkungan (So).
  - 4) Kondisi tanah dasar (MR).

- 5) Proyeksi lalu lintas (jumlah kendaraan dan distribusi beban sumbu).
- b. Menghitung ESAL (W18)

ESAL dihitung dari distribusi jenis kendaraan, jumlah kendaraan per hari, pertumbuhan lalu lintas, dan faktor pembobot beban sumbu.

$$W_{18} = \sum_{i=1}^n (ADT_i \cdot G_i \cdot 365 \cdot LTF \cdot 18)$$

di mana:

- $ADT_i$  = Average Daily Traffic kendaraan ke-i
- $G_i$  = Faktor pembobot beban sumbu kendaraan ke-i
- $LTG$  = Lalu lintas pertumbuhan tahunan

- c. Menentukan *Structural Number* (SN)

Menggunakan persamaan desain AASHTO, SN dihitung berdasarkan ESAL, kondisi tanah dasar, faktor lingkungan, reliabilitas, dan deviasi standar kegagalan.

- d. Menentukan Ketebalan Lapisan Perkerasan

Dengan mengetahui nilai SN dan koefisien material (a), ketebalan setiap lapisan perkerasan dapat dihitung menggunakan persamaan:

$$SN = a_1 D_1 + a_2 D_2 + a_3 D_3$$

#### 4. Tabel Contoh Perhitungan AASHTO 1993

Berikut adalah contoh tabel yang umum digunakan dalam proses desain:

Tabel 4. Contoh Nilai Koefisien Lapisan (a)

Lapisan	Material	Koefisien (a)
Surface course	Asphalt Concrete	0.44
Base course	Crushed Aggregate	0.14
Subbase course	Granular Material	0.11

Tabel 5. Contoh Perhitungan ESAL (W18)

Jenis Kendaraan	ADT	Faktor Pembobot	Pertumbuhan (%)	ESAL/tahun
Truk Berat	500	2.5	5	1,095,000
Bus	200	1.0	3	219,000
Kendaraan Ringan	1,000	0.2	2	146,000

$$\text{Total W18 (18 tahun)} = \Sigma(\text{ESAL/tahun} \times 18) = 24,750,000$$

### 5. Kelebihan Metode AASHTO 1993

- a. Basis Data Empiris: Berdasarkan hasil pengujian AASHO Road Test yang ekstensif.
- b. Kesederhanaan: Tidak memerlukan perangkat lunak rumit seperti pada metode mekanis-empiris.
- c. Pengakuan Internasional: Banyak digunakan di berbagai negara sebagai standar desain.
- d. Parameter Desain yang Terukur: Memiliki parameter yang jelas dan dapat diukur di lapangan.

### 6. Kekurangan Metode AASHTO 1993

- a. Kurang Fleksibel: Tidak mempertimbangkan secara rinci respon mekanika lapisan perkerasan.
- b. Ketergantungan pada Data Empiris: Efektivitasnya terbatas jika kondisi lapangan berbeda jauh dari data AASHO Road Test.
- c. Keterbatasan Faktor Lingkungan: Faktor iklim diabaikan secara detail dibandingkan metode mekanis-empiris.

### 7. Perkembangan dan Integrasi Metode AASHTO 1993

Metode AASHTO 1993 merupakan tonggak penting dalam desain perkerasan jalan yang berbasis empiris. Metode ini menggunakan konsep *Equivalent Single Axle Load* (ESAL) untuk memperkirakan kumulatif beban lalu lintas selama umur rencana jalan, serta memperhitungkan faktor-faktor lingkungan seperti drainase, kondisi tanah dasar, dan faktor keandalan. Kesederhanaan perhitungan dalam metode ini membuatnya sangat populer dan banyak digunakan di berbagai negara, terutama di negara berkembang dengan keterbatasan data material maupun kondisi lalu lintas yang detail (AASHTO, 2015).

Seiring meningkatnya kebutuhan akan desain perkerasan yang lebih presisi, metode ini berkembang menjadi *Mechanistic-Empirical Pavement Design Guide* (MEPDG). Berbeda dengan metode AASHTO 1993 yang berbasis empiris murni, MEPDG menggabungkan perhitungan respon mekanis pada struktur perkerasan, seperti tegangan, regangan, dan defleksi, yang dianalisis dengan teori lapisan elastis. Hasil analisis ini kemudian dikalibrasi dengan data empiris dari laboratorium maupun lapangan. Dengan demikian, MEPDG tidak hanya mempertahankan konsep ESAL dan faktor lingkungan dari metode AASHTO 1993, tetapi juga meningkatkan akurasi prediksi umur layanan jalan dengan mempertimbangkan mekanisme kerusakan utama seperti *fatigue cracking* dan rutting.

### C. Metode Manual Desain Perkerasan Jalan (MDPJ – Indonesia)

Metode Manual Desain Perkerasan Jalan (MDPJ) adalah pedoman resmi yang digunakan di Indonesia untuk perencanaan dan desain ketebalan perkerasan jalan, terutama untuk jalan lentur (*flexible pavement*). MDPJ dikembangkan oleh Kementerian Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat (PUPR) sebagai panduan teknis yang mengacu pada kondisi lalu lintas, material lokal, dan kondisi iklim di Indonesia (Kementerian PUPR, 2017). MDPJ menjadi acuan penting karena kondisi geoteknik, iklim, dan karakter lalu lintas di Indonesia memiliki perbedaan signifikan dengan negara lain. Oleh sebab itu, MDPJ disusun secara spesifik untuk kebutuhan pembangunan dan pemeliharaan infrastruktur jalan nasional, dengan menyesuaikan standar internasional seperti metode AASHTO dan metode mekanis-empiris.

MDPJ berpedoman pada konsep desain empiris yang diperkuat dengan unsur mekanika perkerasan. Prinsip utama MDPJ adalah memastikan ketahanan perkerasan terhadap beban lalu lintas selama umur desain yang ditentukan, dengan mempertimbangkan kondisi tanah dasar, iklim, material perkerasan, dan biaya konstruksi. Konsep dasar MDPJ memanfaatkan *Structural Number* (SN), seperti halnya metode AASHTO, yang kemudian dihubungkan dengan ketebalan lapisan perkerasan melalui koefisien material lokal yang telah ditentukan.

## 1. Komponen Utama Desain MDPJ

### a. Parameter Desain

Pada MDPJ, beberapa parameter penting yang harus diperhitungkan antara lain:

- 1) Kondisi lalu lintas – jumlah kendaraan, jenis kendaraan, pertumbuhan lalu lintas, distribusi beban.
- 2) Kualitas tanah dasar (subgrade) – dinilai menggunakan nilai CBR (*California Bearing Ratio*) atau modulus resilien.
- 3) Material perkerasan – kualitas aspal, agregat base, agregat subbase.
- 4) Faktor lingkungan – curah hujan, siklus pembekuan-pencairan, suhu.
- 5) Umur layanan – biasanya ditetapkan berdasarkan kategori jalan (misalnya 10–20 tahun).

### b. Prinsip Perhitungan

Perhitungan MDPJ didasarkan pada hubungan empiris antara ketebalan lapisan perkerasan dengan nilai CBR tanah dasar dan jumlah beban ekuivalen sumbu tunggal (ESAL).

Persamaan umum dalam MDPJ adalah:

$$D = f(CBR, W, k)$$

di mana:

- D = Ketebalan lapisan perkerasan
- CBR = California Bearing Ratio tanah dasar
- W = Beban lalu lintas dalam ESAL
- k = Faktor koreksi untuk kondisi material dan iklim

## 2. Langkah Perancangan MDPJ

### a. Menentukan Lalu Lintas Desain

Lalu lintas desain dihitung dari data traffic count, distribusi kendaraan, dan pertumbuhan lalu lintas. Lalu lintas ini dikonversi ke dalam ESAL selama umur desain jalan, menggunakan faktor pembobot sesuai jenis kendaraan.

$$W_{MDPJ} = ADT \times LF \times 365 \times LTF \times n$$

di mana:

- ADT = Average Daily Traffic
- LF = Load Factor
- LTF = Lalu lintas pertumbuhan tahunan
- n = umur desain (tahun)

b. Menentukan Kondisi Tanah Dasar

CBR tanah dasar diukur menggunakan uji laboratorium atau lapangan. Nilai CBR menjadi parameter kunci dalam menentukan ketebalan lapisan perkerasan.

Tabel 6. Hubungan CBR Tanah Dasar dengan Ketebalan Perkerasan (MDPJ, 2017)

CBR (%)	Kualitas Tanah Dasar	Faktor Kekuatan (k)
< 3	Sangat Rendah	1.00
3–5	Rendah	0.90
5–10	Sedang	0.75
10–15	Baik	0.60
> 15	Sangat Baik	0.50

(Sumber: Kementerian PUPR, 2017)

c. Menghitung Ketebalan Perkerasan

MDPJ menyediakan persamaan empiris yang menghubungkan nilai CBR, ESAL, dan faktor material. Persamaan yang umum digunakan adalah:

$$D = \alpha \cdot (W_{MDPJ})^{\beta} \cdot CBR^{-\gamma}$$

di mana:

- $\alpha, \beta, \gamma$  = Konstanta yang ditentukan dari data lapangan dan panduan MDPJ.

Tabel 7. Nilai Koefisien  $\alpha, \beta, \gamma$  (MDPJ, 2017)

Koefisien	Nilai
$\alpha$	1.2
$\beta$	0.35
$\gamma$	0.25

(Catatan: Nilai ini bervariasi tergantung pada kelas jalan dan kondisi lokasi)

d. Menentukan Struktur Lapisan Perkerasan

Setelah ketebalan total perkerasan dihitung, langkah berikutnya adalah menentukan distribusi ketebalan pada setiap lapisan:

- 1) Lapisan permukaan (*surface course*) – biasanya terdiri dari aspal beton (AC) dengan ketebalan 4–7 cm untuk jalan lokal, hingga 7–12 cm untuk jalan arteri.
- 2) Lapisan pondasi (*base course*) – agregat kelas I atau II dengan ketebalan 15–25 cm.
- 3) Lapisan pondasi bawah (*subbase course*) – agregat granular kelas II atau limbah konstruksi, ketebalan bervariasi tergantung kondisi tanah dasar.

Tabel 8. Distribusi Ketebalan Lapisan Perkerasan Lentur (MDPJ, 2017)

Jenis Lapisan	Ketebalan (cm)	Material
Surface Course	5–12	Aspal Beton (AC)
Base Course	15–25	Agregat Kelas I-II
Subbase Course	10–20	Agregat Granular

### 3. Kelebihan Metode MDPJ

- a. Disesuaikan dengan kondisi Indonesia: lalu lintas, material, iklim.
- b. Mudah digunakan oleh praktisi teknik sipil di lapangan.
- c. Memberikan panduan desain yang jelas dan sederhana.
- d. Memiliki basis data empiris lokal.

### 4. Kekurangan Metode MDPJ

- a. Kurang mempertimbangkan respon mekanis lapisan perkerasan secara mendalam.
- b. Tidak fleksibel terhadap kondisi lalu lintas ekstrem atau perubahan iklim.
- c. Perlu pembaruan data empiris agar tetap relevan.

## D. Perhitungan Tebal Lapisan

Perhitungan tebal lapisan pada perkerasan lentur (*flexible pavement*) merupakan tahap kunci dalam desain struktur jalan. Tebal lapisan menentukan kemampuan perkerasan untuk menahan beban lalu lintas, kondisi lingkungan, serta umur layanan yang diinginkan (Douglas, 2018). Tebal lapisan perkerasan lentur dihitung berdasarkan prinsip distribusi beban, dimana lapisan atas menahan beban langsung kendaraan dan lapisan bawah berfungsi mendistribusikan tekanan ke tanah dasar (subgrade). Oleh karena itu, perhitungan tebal lapisan harus mempertimbangkan:

1. Karakteristik lalu lintas (*traffic loading*).
2. Kondisi tanah dasar (*subgrade support*).
3. Sifat material lapisan perkerasan.
4. Faktor lingkungan seperti iklim dan drainase.

Metode perhitungan tebal lapisan dapat dilakukan secara empiris (AASHTO, MDPJ) atau mekanis-empiris (*Mechanistic-Empirical Pavement Design Guide – MEPDG*).

Konsep perhitungan tebal lapisan lentur berakar pada teori lapisan elastis (*Layered Elastic Theory*), dimana struktur perkerasan dianggap terdiri atas beberapa lapisan homogen elastis dengan sifat material tertentu (Su et al., 2017). Prinsip dasar meliputi:

1. Distribusi Beban: Beban kendaraan didistribusikan melalui lapisan perkerasan ke lapisan di bawahnya hingga tanah dasar.
2. Kelelahan Material: Tebal lapisan harus cukup untuk menghindari kegagalan akibat fatigue cracking dan rutting.
3. Kondisi Tanah Dasar: Tanah dasar yang lunak memerlukan ketebalan lapisan yang lebih besar untuk mendistribusikan beban secara efektif.

Berbagai metode digunakan dalam menghitung tebal lapisan perkerasan lentur, antara lain:

1. Metode Empiris: Seperti metode AASHTO 1993 dan MDPJ Indonesia.
2. Metode Mekanis-Empiris: Menggunakan analisis mekanika dan data empiris.
3. Perhitungan Manual: Berdasarkan tabel atau diagram dari panduan desain resmi.

Faktor yang mempengaruhi tebal lapisan:

1. Lalu Lintas Desain: Jumlah kendaraan, proporsi kendaraan berat, dan pertumbuhan lalu lintas sangat mempengaruhi ketebalan lapisan. Parameter ini diukur dalam ESAL selama umur desain.
2. Kondisi Tanah Dasar: Tanah dasar lunak memerlukan lapisan perkerasan yang lebih tebal untuk mendistribusikan beban. Nilai CBR atau Modulus Resilien digunakan sebagai parameter penentu.
3. Kualitas Material: Koefisien material (a) berbeda tergantung jenis dan kualitas material lapisan. Material dengan kekuatan lebih tinggi dapat mengurangi ketebalan lapisan.
4. Faktor Lingkungan: Curah hujan, suhu, dan drainase memengaruhi ketahanan perkerasan, sehingga perlu dipertimbangkan dalam perhitungan ketebalan lapisan.
5. Umur Layanan: Umur desain yang lebih panjang memerlukan ketebalan lapisan yang lebih besar untuk menjaga kinerja perkerasan selama periode tersebut.

#### Contoh Perhitungan Tebal Lapisan

Kasus:

- Jalan arteri, umur desain = 20 tahun
- ADT = 5,000 kendaraan/hari
- Proporsi kendaraan berat = 20%
- Nilai CBR tanah dasar = 6%

#### Langkah 1: Hitung ESAL

$$W_{MDPJ} = ADT \times LF \times 365 \times LTF \times n$$

Misal: LF = 2.5, LTF = 1.05, n = 20 tahun

$$W = 5000 \times 0.20 \times 365 \times 1.05 \times 20 = 7665000 \text{ ESAL}$$

#### Langkah 2: Hitung Ketebalan Perkerasan (MDPJ)

$$D = 1.2 \times (7665000)^{0.35} \times (6)^{-0.25}$$

$$D \approx 45 \text{ cm}$$

### **Langkah 3: Distribusi Ketebalan Lapisan**

Mengacu pada panduan MDPJ:

- Surface Course = 7 cm
- Base Course = 25 cm
- Subbase Course = 13 cm

Tabel 9. Distribusi Tebal Lapisan (Contoh)

Lapisan	Tebal (cm)	Material
Surface Course	7	Aspal Beton (AC)
Base Course	25	Agregat Kelas I-II
Subbase Course	13	Agregat Granular
<b>Total</b>	<b>45</b>	

## **E. Analisis dan Evaluasi Performa**

Analisis dan evaluasi performa perkerasan lentur (*flexible pavement*) merupakan tahap penting dalam siklus hidup jalan. Tahapan ini bertujuan untuk memastikan bahwa desain yang dibuat memenuhi kebutuhan teknis, keselamatan, dan biaya pemeliharaan, serta tahan terhadap beban lalu lintas dan kondisi lingkungan selama umur layanannya (Huang, 2004). Performa perkerasan lentur tidak hanya bergantung pada ketebalan lapisan dan kualitas material, tetapi juga pada manajemen pemeliharaan, kondisi lalu lintas, serta faktor eksternal seperti iklim dan drainase. Analisis performa dilakukan pada dua tahap utama:

1. Analisis Desain – menguji apakah desain memenuhi syarat teknis dan umur layanan.
2. Evaluasi Lapangan – memverifikasi performa perkerasan setelah konstruksi dan selama masa layanan.

Evaluasi performa perkerasan lentur dilakukan berdasarkan sejumlah indikator teknis, antara lain:

1. Kondisi Permukaan: Mengukur kehalusan permukaan (*roughness*) dengan indikator *International Roughness Index* (IRI).
2. Retak Fatigue: Mengukur jumlah retak yang terjadi akibat siklus beban berulang.
3. Rutting: Deformasi permanen pada jalur lalu lintas akibat konsolidasi lapisan perkerasan.

4. Penurunan Modulus Resilien: Penurunan kemampuan material dalam mendukung beban lalu lintas.
5. Drainase dan Efek Lingkungan: Efektivitas sistem drainase dan dampak curah hujan.

## 1. Metode Analisis Performa

### a. Analisis Mekanis

Analisis mekanis dilakukan menggunakan teori lapisan elastis (*Layered Elastic Theory*) atau metode mekanis-empiris (*Mechanistic-Empirical Pavement Design*).

Metode ini mengevaluasi performa dengan menghitung parameter kritis seperti:

- 1) Regangan pada permukaan bawah lapisan permukaan (*bottom-up fatigue strain*).
- 2) Tegangan permukaan lapisan pondasi (*surface rutting strain*).

Tabel 10. Batas Kinerja Fatigue dan Rutting (AASHTO, 1993)

Parameter	Nilai Batas Kinerja
Fatigue Strain ( $\epsilon_f$ )	$\leq 70 \times 10^{-6}$
Rutting Strain ( $\epsilon_v$ )	$\leq 2000 \times 10^{-6}$

Jika nilai strain melebihi batas ini, perkerasan akan mengalami retak atau deformasi berlebih sebelum umur desain terpenuhi.

### b. Analisis Empiris

Metode empiris seperti MDPJ menghitung ketebalan lapisan dengan asumsi kondisi ideal. Analisis performa dilakukan dengan membandingkan hasil pengukuran lapangan dengan prediksi desain awal.

### c. Evaluasi Lapangan

Evaluasi lapangan melibatkan inspeksi visual dan pengukuran teknis, seperti:

- 1) Pengukuran IRI menggunakan profilometer.
- 2) Uji CBR atau Modulus Resilien lapangan (FWD – *Falling Weight Deflectometer*).
- 3) Pemantauan deformasi menggunakan sensor jalan pintar (*smart pavement systems*).

## **2. Proses Evaluasi Performa Perkerasan Lentur**

### a. Analisis Desain Awal

Tahap ini menggunakan data lalu lintas, tanah dasar, dan material untuk memprediksi kinerja perkerasan selama umur desain. Dengan metode mekanis-empiris, evaluasi dilakukan dengan simulasi komputer menggunakan software desain seperti AASHTOWare Pavement ME Design. Langkah Analisis Desain Awal:

- 1) Input data lalu lintas (ESAL).
- 2) Input kondisi tanah dasar (CBR atau Modulus Resilien).
- 3) Input karakteristik material lapisan perkerasan.
- 4) Analisis respons lapisan perkerasan terhadap beban lalu lintas.
- 5) Penentuan ketebalan lapisan yang memenuhi kriteria fatigue dan rutting.

### b. Evaluasi Setelah Konstruksi

Evaluasi ini dilakukan setelah pembangunan selesai untuk memastikan bahwa ketebalan lapisan dan kualitas material sesuai dengan spesifikasi desain. Metode evaluasi dapat meliputi:

- 1) Uji kepadatan (*density test*).
- 2) Pengujian kekakuan material (*modulus test*).
- 3) Pemeriksaan visual terhadap retak awal atau deformasi.

### c. Evaluasi Performa Selama Operasional

Evaluasi berkala dilakukan untuk memantau kondisi perkerasan selama masa layanan. Teknik evaluasi dapat meliputi:

- 1) Pengukuran profil permukaan untuk menentukan nilai IRI.
- 2) Uji defleksi menggunakan FWD untuk menilai penurunan kekakuan struktur perkerasan.
- 3) Inspeksi visual terhadap retak, lubang, atau deformasi permukaan.

## **3. Faktor yang Mempengaruhi Performa Perkerasan Lentur**

### a. Beban Lalu Lintas

Beban lalu lintas merupakan faktor paling dominan yang mempengaruhi performa perkerasan lentur. Setiap kendaraan, terutama kendaraan berat seperti truk dan bus, memberikan tekanan berulang pada lapisan perkerasan. Tekanan ini menimbulkan tegangan dan regangan yang terakumulasi dari

waktu ke waktu, sehingga dapat memicu kerusakan struktural. Peningkatan volume kendaraan berat secara signifikan mempercepat terjadinya fatigue cracking dan rutting, dua bentuk kerusakan utama pada perkerasan lentur. Semakin besar intensitas dan repetisi beban lalu lintas, semakin cepat pula penurunan kinerja perkerasan.

Distribusi beban dan pola pergerakan kendaraan juga berperan penting. Kendaraan yang sering melintas pada jalur tertentu dapat menimbulkan konsentrasi tegangan yang berulang di lokasi yang sama, mempercepat deformasi permanen. Oleh karena itu, perhitungan beban lalu lintas dalam desain perkerasan biasanya dikonversi ke dalam satuan *Equivalent Single Axle Load* (ESAL) untuk memperkirakan akumulasi kerusakan selama umur rencana jalan. Dengan mempertimbangkan faktor ini secara tepat, perkerasan dapat dirancang agar memiliki daya tahan yang lebih baik dan mampu menahan beban lalu lintas beragam selama masa layanannya.

b. Kualitas Material

Kualitas material merupakan faktor krusial dalam menentukan performa perkerasan lentur. Material dengan modulus elastisitas tinggi mampu menahan beban lalu lintas dengan lebih baik, mengurangi regangan tarik pada lapisan permukaan, serta menunda terjadinya kerusakan seperti retak dan deformasi plastis. Selain itu, daya dukung material memengaruhi distribusi tegangan ke lapisan bawah, sehingga material yang berkualitas tinggi berperan penting dalam memperpanjang umur layanan perkerasan (Jamshidi & White, 2019).

Modifikasi material, khususnya aspal, menjadi strategi penting untuk meningkatkan kualitas perkerasan. Penggunaan *polymer modified asphalt* (PMA) adalah salah satu contoh yang efektif, karena meningkatkan viskoelastisitas dan ketahanan terhadap perubahan suhu. PMA dapat mengurangi risiko retak pada suhu rendah serta deformasi pada suhu tinggi, sehingga meningkatkan performa struktural perkerasan. Dengan kualitas material yang baik dan teknologi modifikasi yang tepat, perkerasan lentur mampu bertahan lebih lama dengan biaya pemeliharaan yang lebih efisien.

c. Kondisi Tanah Dasar

Kondisi tanah dasar (subgrade) memiliki peranan penting dalam menentukan performa perkerasan lentur. Tanah dasar dengan nilai *California Bearing Ratio* (CBR) rendah cenderung mengalami deformasi berlebih ketika menerima beban lalu lintas, yang pada akhirnya mempercepat terjadinya kerusakan seperti retak dan deformasi permanen. Hal ini terjadi karena tanah dasar yang lemah tidak mampu mendistribusikan beban secara optimal, sehingga tegangan dan regangan di lapisan perkerasan meningkat (Gonçalves & Margarido, 2016).

Untuk mengatasi masalah tersebut, perbaikan tanah dasar atau subgrade improvement menjadi langkah penting dalam desain perkerasan lentur. Teknik seperti stabilisasi tanah dengan kapur, semen, fly ash, atau penggunaan geosintetik dapat meningkatkan daya dukung tanah dasar dan mengurangi deformasi. Dengan kondisi subgrade yang lebih baik, lapisan perkerasan dapat bekerja secara optimal, memperpanjang umur layanan jalan, serta mengurangi biaya pemeliharaan jangka panjang. Upaya ini memastikan perkerasan lentur lebih tahan terhadap beban lalu lintas dan kondisi lingkungan yang berubah.

d. Faktor Lingkungan

Faktor lingkungan memiliki pengaruh signifikan terhadap performa perkerasan lentur. Curah hujan tinggi, siklus pembekuan-pencairan, dan suhu ekstrem dapat mempercepat proses degradasi material perkerasan. Air yang meresap ke dalam struktur perkerasan akibat drainase yang buruk dapat menurunkan kekakuan lapisan bawah dan meningkatkan risiko deformasi serta retak. Selain itu, fluktuasi suhu yang ekstrem dapat menyebabkan ekspansi dan kontraksi material perkerasan, sehingga mempercepat kerusakan permukaan (Gouveia et al., 2022).

Drainase yang efektif menjadi faktor kunci untuk mengatasi masalah lingkungan tersebut. Sistem drainase yang baik dapat mencegah penumpukan air pada lapisan base dan subbase, menjaga stabilitas tanah dasar, serta memperpanjang umur layanan perkerasan. Oleh karena itu, dalam desain perkerasan lentur, analisis kondisi lingkungan dan penerapan solusi drainase

harus menjadi bagian integral untuk memastikan kinerja jalan yang optimal dan berkelanjutan.

#### 4. Teknik Evaluasi Modern

Perkembangan teknologi telah meningkatkan kemampuan evaluasi performa perkerasan:

- a. *Falling Weight Deflectometer (FWD)* – untuk mengukur defleksi perkerasan.
- b. *Ground Penetrating Radar (GPR)* – untuk memetakan kondisi lapisan dalam.
- c. Sensor Pintar dan IoT – memantau kondisi lalu lintas dan deformasi secara real-time.

Tabel 11. Perbandingan Metode Evaluasi Performa

Metode Evaluasi	Keunggulan	Kekurangan
FWD	Akurat untuk modifikasi struktur	Perlu peralatan mahal
Profilometer	Mudah mengukur kehalusan permukaan	Tidak mendekripsi lapisan dalam
GPR	Deteksi kondisi lapisan dalam	Mahal dan butuh keahlian
Sensor Pintar	Monitoring real-time	Perlu investasi awal tinggi





# BAB VI

## PERANCANGAN

# PERKERASAN KAKU

---

Perancangan perkerasan kaku (*rigid pavement*) merupakan elemen penting dalam pembangunan jalan raya, terutama untuk jalan dengan volume lalu lintas tinggi dan beban berat seperti jalan tol, bandara, dan jalan arteri utama. Perkerasan kaku menggunakan beton semen sebagai bahan utama, yang memiliki kekakuan tinggi sehingga mampu menyalurkan beban secara luas. Perancangan perkerasan kaku menuntut pendekatan teknis yang cermat, karena struktur ini memerlukan pertimbangan khusus terhadap ketebalan slab beton, desain sendi, kontrol retak, serta kualitas material. Bab ini menjelaskan prinsip-prinsip desain dan teknik yang digunakan untuk menghasilkan struktur perkerasan kaku yang tahan lama dan ekonomis.

Bab ini membahas aspek-aspek penting dalam perancangan perkerasan kaku, meliputi prinsip dasar desain, jenis slab beton seperti JPCP (*Jointed Plain Concrete Pavement*), JRCP (*Jointed Reinforced Concrete Pavement*), dan CRCP (*Continuously Reinforced Concrete Pavement*). Pembahasan juga mencakup metode perancangan seperti AASHTO dan PCA, desain sendi dan dowel, serta strategi kontrol retak dan deformasi. Semua aspek ini diuraikan untuk memberikan pemahaman komprehensif tentang bagaimana elemen-elemen tersebut berkontribusi pada kinerja dan daya tahan perkerasan kaku.

### A. Prinsip Dasar Desain Rigid Pavement

Perkerasan kaku (*rigid pavement*) merupakan salah satu jenis konstruksi jalan yang menggunakan beton semen portland (*Portland Cement Concrete – PCC*) sebagai lapisan permukaan yang utama. Desain rigid pavement berbeda secara signifikan dari perkerasan lentur (*flexible*). **Buku Referensi**

*pavement*) karena memiliki mekanisme penyaluran beban yang unik, sifat material yang berbeda, dan karakteristik kegagalan yang khas (Assogba et al., 2021). Prinsip dasar desain rigid pavement bertujuan untuk memastikan bahwa struktur beton dapat menahan beban lalu lintas selama umur desain yang ditentukan, sambil mempertahankan kenyamanan pengguna, keselamatan, serta efisiensi biaya pemeliharaan.

*Rigid pavement* memiliki sifat yang berbeda dibandingkan perkerasan lentur. Karakteristik utama meliputi:

1. Modulus Elastis Tinggi: Beton memiliki modulus elastis yang jauh lebih tinggi daripada aspal. Hal ini memungkinkan rigid pavement untuk menyalurkan beban kendaraan secara luas ke lapisan di bawahnya.
2. Distribusi Beban Melalui Lapisan: Beban yang diberikan kendaraan didistribusikan melalui beton ke area yang lebih luas di bawah permukaan, sehingga tekanan pada tanah dasar relatif rendah.
3. Resistensi Terhadap Deformasi Permanen: Beton memiliki sifat kaku sehingga deformasi akibat beban seperti rutting hampir tidak terjadi.
4. Mekanisme Kegagalan Berbeda: Kegagalan pada rigid pavement biasanya berupa retak akibat fatigue, distress pada sambungan (*joint distress*), atau penurunan struktural karena kondisi tanah dasar (*pumping, faulting*, atau *corner breaks*).

Desain *rigid pavement* mengikuti prinsip-prinsip mekanika struktur beton, teori elastis lapisan, dan analisis distress yang dipengaruhi oleh kondisi lalu lintas dan lingkungan. Prinsip-prinsip tersebut meliputi:

Desain rigid pavement dipengaruhi oleh beberapa faktor utama:

1. Lalu Lintas Desain: Jumlah kendaraan berat dan *distribusi axle load* (ESAL) merupakan faktor dominan. Desain harus mengakomodasi pertumbuhan lalu lintas selama umur desain.
2. Karakteristik Beton: Kualitas beton mempengaruhi modulus elastis, resistensi retak, dan umur slab beton. Beton dengan tambahan *polymer modifiers* atau *pozzolanic materials* dapat meningkatkan kinerja.
3. Kondisi Tanah Dasar: Modulus reaksi tanah dasar ( $k$ ) menentukan seberapa efektif slab beton menyalurkan beban ke

- tanah. Tanah dasar yang lunak memerlukan slab beton lebih tebal atau perbaikan tanah dasar (*subgrade improvement*).
4. Sistem Sambungan: Desain sambungan mempengaruhi distribusi beban antar slab dan umur sambungan. Sambungan yang dirancang baik dapat mencegah kegagalan struktural dini.
  5. Faktor Lingkungan: Perubahan suhu, kelembaban, dan curah hujan mempengaruhi ekspansi/kontraksi slab beton. Drainase yang baik dapat memperpanjang umur slab beton.

## 1. Penentuan Tebal Slab Beton

Tebal slab beton merupakan parameter kritis dalam desain rigid pavement. Tebal slab ditentukan berdasarkan beban lalu lintas (ESAL), modulus tanah dasar, kualitas beton, kondisi iklim, serta faktor keamanan. Prinsip perhitungan tebal slab beton mengikuti teori Westergaard untuk analisis tegangan dan regangan pada beton di bawah beban titik (*point load*) atau beban garis (*line load*) (Westergaard, 1927).

Persamaan dasar Westergaard:

$$\sigma = \frac{3P}{2\pi h^2} \left( 1 + \frac{1}{(1+\mu)} \right)$$

Dimana:

- $\sigma$  = tegangan pada permukaan beton
- $P$  = beban sumbu tunggal
- $h$  = ketebalan slab beton
- $\mu$  = Poisson's ratio beton

Tebal slab yang optimal adalah yang menghasilkan tegangan dalam beton berada di bawah batas lelah (*fatigue limit*) beton selama umur desain.

## 2. Analisis Tegangan dan Retak Fatigue

Tegangan kritis pada rigid pavement biasanya terjadi di bawah titik beban (*corner loading*) dan di sekitar sambungan (*joint loading*). Desain harus mempertimbangkan distribusi tegangan ini untuk mencegah retak fatigue.

- a. *Corner Loading*: Beban pada sudut slab beton dapat menyebabkan retak pada titik sudut slab karena momen lentur maksimum terjadi di sana.
- b. *Joint Loading*: Beban di dekat sambungan menyebabkan tegangan konsentrasi yang dapat menimbulkan faulting.

Retak fatigue dihitung dengan memperhitungkan jumlah siklus beban (ESAL) dan modulus beton, mengikuti persamaan:

$$N_f = k \left( \frac{1}{\varepsilon_t} \right)^m$$

Dimana:

- $N_f$  = jumlah siklus beban hingga retak fatigue
- $\varepsilon_t$  = regangan tarik di permukaan bawah beton
- k, m = konstanta material beton.

### 3. Desain Sambungan dan Edge Support

Rigid pavement umumnya dibuat dalam bentuk slab beton diskret dengan sambungan (*joints*) untuk mengontrol retak alami akibat penyusutan beton dan perubahan suhu. Jenis sambungan:

- a. *Contraction Joints*: Mengontrol retak akibat penyusutan beton.
- b. *Construction Joints*: Menghubungkan dua tahap konstruksi.
- c. *Expansion Joints*: Mengakomodasi perubahan panjang slab akibat perubahan suhu.

Desain sambungan mempertimbangkan jarak antar sambungan (*joint spacing*), kedalaman pemotongan, dan kondisi dukungan tepi slab (*edge support*). Sambungan harus dirancang agar beban dapat ditransfer secara efektif antar slab.

### 4. Faktor Iklim dan Drainase

Kondisi iklim memiliki pengaruh signifikan terhadap kinerja perkerasan kaku (*rigid pavement*). Perubahan suhu yang ekstrem dapat menyebabkan ekspansi dan kontraksi slab beton, yang berpotensi menimbulkan retak termal atau pergeseran sambungan. Fenomena ini mempengaruhi distribusi tegangan pada slab beton dan dapat mempercepat kerusakan jika tidak diantisipasi dalam desain. Selain itu, variasi suhu juga berdampak pada modulus elastisitas beton dan tanah

dasar, sehingga mempengaruhi daya dukung struktur perkerasan secara keseluruhan.

Drainase yang buruk menjadi faktor tambahan yang dapat mempercepat kerusakan perkerasan kaku. Air yang meresap ke dalam lapisan perkerasan atau tanah dasar dapat mengubah kelembaban tanah, sehingga menurunkan kekakuanannya. Perubahan kondisi kelembaban ini mengakibatkan distribusi tegangan menjadi tidak merata, yang berisiko menimbulkan masalah seperti pumping di mana air dan material halus ter dorong ke permukaan sambungan atau faulting pada sambungan slab beton. Dampak tersebut dapat menurunkan kenyamanan berkendara dan memperpendek umur layanan jalan.

## B. Jenis-Jenis Slab Beton (JPCP, JRCP, CRCP)

Perkerasan kaku (*rigid pavement*) umumnya menggunakan slab beton semen portland (*Portland Cement Concrete – PCC*) sebagai elemen struktural utamanya. Berdasarkan metode penyaluran beban, sambungan, dan konstruksi slab beton, terdapat tiga jenis utama perkerasan kaku yang umum digunakan:

- 1) *Jointed Plain Concrete Pavement* (JPCP)
- 2) *Jointed Reinforced Concrete Pavement* (JRCP)
- 3) *Continuously Reinforced Concrete Pavement* (CRCP)

Setiap jenis slab beton memiliki karakteristik desain, metode konstruksi, kelebihan, dan kelemahan tersendiri. Pemilihan jenis slab beton dilakukan berdasarkan kondisi lalu lintas, biaya, umur layanan, kondisi tanah dasar, dan faktor lingkungan (Das, 2023).

Pemilihan jenis slab beton dalam desain rigid pavement didasarkan pada sejumlah faktor teknis dan ekonomis, seperti:

- 1) Lalu lintas desain (volume dan proporsi kendaraan berat).
- 2) Kondisi tanah dasar (*subgrade*).
- 3) Umur layanan yang diharapkan.
- 4) Biaya konstruksi dan pemeliharaan.
- 5) Faktor lingkungan seperti iklim dan curah hujan.

### 1. *Jointed Plain Concrete Pavement* (JPCP)

JPCP adalah perkerasan kaku yang terdiri dari slab beton tanpa tulangan utama (*main reinforcement*), tetapi memiliki sambungan potong (*transverse joints*) pada interval tertentu untuk mengontrol retak

akibat penyusutan beton dan perubahan suhu. Karakteristik utama JPCP meliputi:

- a. Tidak menggunakan tulangan utama.
- b. Menggunakan sambungan potong (*transverse joints*) dengan pengisi sambungan (*joint filler*) dan sealant.
- c. Jarak sambungan biasanya berkisar antara 4,5–6 meter.
- d. Mengandalkan kedalaman pemotongan (*joint cut depth*) untuk mengontrol retak.

Desain JPCP menekankan pada:

- a. Penentuan ketebalan slab beton (h).
- b. Penentuan jarak sambungan potong (*joint spacing*).
- c. Desain sistem drainase.
- d. Analisis distress seperti retak fatigue dan faulting pada sambungan.

Prinsip perhitungan jarak sambungan menggunakan hubungan antara ketebalan slab beton, modulus reaksi tanah dasar (k), dan lebar slab:

$$L = C\sqrt{h \cdot k}$$

Dimana:

- L = jarak sambungan
- h = ketebalan slab beton
- k = modulus reaksi tanah dasar
- C = konstanta empiris berdasarkan pengalaman lapangan

Kelebihan JPCP:

- a. Konstruksi relatif sederhana.
- b. Biaya awal lebih rendah dibandingkan CRCP.
- c. Cocok untuk lalu lintas sedang hingga tinggi.

Kekurangan JPCP:

- a. Memerlukan pemeliharaan sambungan secara periodik.
- b. Risiko faulting pada sambungan tinggi jika beban lalu lintas sangat berat.
- c. Umur layanan biasanya 20–25 tahun tanpa rehabilitasi signifikan.

## **2. *Jointed Reinforced Concrete Pavement (JRCP)***

JRCP adalah perkerasan kaku yang menggunakan tulangan baja (*steel reinforcement*) di dalam slab beton, selain sambungan potong. Tulangan ini digunakan untuk mengontrol retak yang terbentuk akibat penyusutan beton, sehingga jarak sambungan dapat dibuat lebih panjang dibandingkan JPCP. Karakteristik utama JRCP meliputi:

- a. Menggunakan tulangan baja pada slab beton.
- b. Jarak sambungan lebih panjang (6–12 meter).
- c. Retak alami terjadi di bawah beban, tetapi posisi retak dikontrol oleh tulangan.
- d. Memiliki kapasitas distribusi beban yang lebih baik dibandingkan JPCP.

Desain JRCP fokus pada:

- a. Penentuan jarak sambungan potong yang optimal.
- b. Penentuan jumlah dan ukuran tulangan baja.
- c. Analisis distress retak fatigue dan faulting.

Penggunaan tulangan baja memungkinkan jarak sambungan diperpanjang, sehingga mengurangi jumlah sambungan yang harus dibangun dan dipelihara.

Kelebihan JRCP:

- a. Mengurangi jumlah sambungan, sehingga mengurangi potensi faulting.
- b. Umur layanan lebih panjang dibandingkan JPCP.
- c. Distribusi beban lebih merata.

Kekurangan JRCP:

- a. Biaya awal lebih tinggi dibandingkan JPCP.
- b. Memerlukan kontrol kualitas tulangan dan beton yang ketat.
- c. Proses konstruksi lebih kompleks (Lee & Kim, 2018).

## **3. *Continuously Reinforced Concrete Pavement (CRCP)***

CRCP adalah perkerasan kaku yang menggunakan tulangan baja kontinu tanpa sambungan potong. Retak yang terjadi pada CRCP tidak dikontrol oleh sambungan potong, tetapi oleh tulangan baja yang mengatur jarak retak dan distribusi beban. Karakteristik utama CRCP meliputi:

- a. Tidak menggunakan sambungan potong.
- b. Tulangan baja kontinu sepanjang slab beton.
- c. Retak alami dikontrol oleh jarak retak yang seragam.
- d. Lebih tahan terhadap faulting dan pembentukan debonding pada sambungan.

Desain CRCP menitikberatkan pada:

- a. Penentuan jumlah tulangan baja dan jarak retak.
- b. Analisis fatigue dan faulting berdasarkan distribusi tegangan pada slab beton.
- c. Perhitungan kapasitas slab beton terhadap siklus beban berulang (ESAL).

Tulangan baja di CRCP biasanya berupa *wire mesh* atau bar reinforcement dengan diameter tertentu yang dihitung berdasarkan beban lalu lintas dan ketebalan slab beton.

Kelebihan CRCP:

- a. Umur layanan sangat panjang ( $> 30$  tahun).
- b. Minim sambungan sehingga mengurangi perawatan sambungan.
- c. Distribusi beban sangat merata.

Kekurangan CRCP:

- a. Biaya konstruksi awal tinggi.
- b. Memerlukan kontrol kualitas tinggi dalam konstruksi.
- c. Kompleksitas konstruksi tinggi.

#### 4. Perbandingan Ketiga Jenis Slab Beton

Tabel 12. Perbandingan JPCP, JRCP, dan CRCP

Jenis Slab Beton	Jarak Sambungan	Tulangan Baja	Umur Layanan	Biaya Konstruksi	Pemeliharaan
JPCP	Pendek (4,5–6 m)	Tidak ada	20–25 tahun	Rendah–Sedang	Tinggi
JRCP	Sedang (6–12 m)	Ada	25–30 tahun	Sedang–Tinggi	Sedang
CRCP	Tidak ada	Ada	$> 30$ tahun	Tinggi	Rendah

## C. Metode AASHTO dan PCA

Desain perkerasan kaku (*rigid pavement*) memerlukan metode yang akurat untuk memastikan slab beton memiliki ketahanan terhadap beban lalu lintas selama umur layanan yang diinginkan. Dua metode yang banyak digunakan dalam perancangan rigid pavement adalah:

- 1) Metode AASHTO (*American Association of State Highway and Transportation Officials*)
- 2) Metode PCA (*Portland Cement Association*)

Kedua metode ini memiliki pendekatan yang berbeda: AASHTO mengembangkan metode desain berbasis empiris dan mekanis-empiris, sedangkan PCA menawarkan pendekatan desain empiris berdasarkan data proyek jalan beton yang telah terbangun dan dianalisis (Delatte, 2017).

### 1. Metode AASHTO untuk Perancangan Perkerasan Kaku

Metode AASHTO didasarkan pada AASHTO Pavement Design Guide (1993) yang dirumuskan dari data eksperimen panjang umur jalan raya di Amerika Serikat. Metode ini menggunakan model empiris yang dikombinasikan dengan analisis mekanis untuk memprediksi ketebalan slab beton yang optimal. Konsep utama metode AASHTO meliputi:

- a. Penentuan jumlah *Equivalent Single Axle Load* (ESAL) selama umur desain.
- b. Perhitungan indeks kinerja struktural (structural number atau SN).
- c. Faktor koreksi untuk kondisi lalu lintas, tanah dasar, iklim, dan kualitas beton.

Persamaan AASHTO untuk rigid pavement berbentuk:

$$D = Z_r \cdot \sqrt[2/3]{\frac{W_{18}}{\beta_1} \cdot \frac{1}{(MR)^b} \cdot \frac{1}{(SN)^c}}$$

Dimana:

- D = ketebalan slab beton (inches atau mm)
- Zr = faktor reliabilitas desain
- W18 = jumlah ESAL selama umur desain

- $\beta_1$ , b, c = konstanta empiris
- MR = modulus reaksi tanah dasar
- SN = structural number

Nilai parameter dalam persamaan ini ditentukan berdasarkan data proyek lapangan dan panduan AASHTO.

Keunggulan Metode AASHTO:

- a. Berbasis data lapangan yang luas dan pengalaman praktis.
- b. Mempertimbangkan faktor lalu lintas dan kondisi tanah dasar.

Kelemahan Metode AASHTO:

- a. Kurang fleksibel untuk kondisi ekstrem yang belum pernah dianalisis sebelumnya.
- b. Memerlukan data lalu lintas dan kondisi tanah dasar yang akurat.

Langkah perancangan metode AASHTO:

- a. Mengestimasi Lalu Lintas Desain

Metode AASHTO untuk perancangan perkerasan kaku memulai proses dengan mengestimasi lalu lintas desain melalui perhitungan *Equivalent Single Axle Load* (ESAL). ESAL dihitung berdasarkan data lalu lintas aktual yang diperoleh dari survei dan pemantauan jalan, termasuk jenis kendaraan, volume lalu lintas, serta distribusi beban sumbu. Perhitungan ini bertujuan untuk mengkonversi beban lalu lintas yang bervariasi menjadi satu nilai standar yang mewakili dampak beban kendaraan terhadap struktur perkerasan selama umur layanan jalan.

Metode AASHTO mempertimbangkan pertumbuhan lalu lintas selama umur desain perkerasan. Faktor pertumbuhan lalu lintas ini biasanya diperoleh dari data historis dan proyeksi pembangunan infrastruktur serta perkembangan ekonomi wilayah. Dengan mempertimbangkan pertumbuhan lalu lintas, perhitungan ESAL menjadi lebih realistik dan relevan. Hasil estimasi lalu lintas desain ini menjadi dasar perhitungan ketebalan slab beton, kualitas material, dan faktor struktural yang menentukan performa serta umur layanan perkerasan kaku.

b. Menentukan Kondisi Tanah Dasar

Pada metode AASHTO untuk perancangan perkerasan kaku, langkah penting setelah estimasi lalu lintas adalah menentukan kondisi tanah dasar. Salah satu parameter utama yang digunakan adalah modulus reaksi tanah ( $k$ ) atau modulus reaksi tanah dasar (MR). Parameter ini mencerminkan kemampuan tanah dasar untuk mendukung beban dari struktur perkerasan. Modulus reaksi tanah biasanya diukur melalui uji lapangan seperti plate load test atau diperoleh dari data geoteknik yang relevan.

Menentukan nilai  $k$  atau MR sangat penting karena kondisi tanah dasar mempengaruhi distribusi tegangan pada slab beton dan menentukan ketebalan slab yang diperlukan. Tanah dasar dengan modulus reaksi rendah akan memerlukan slab beton yang lebih tebal untuk mencegah deformasi berlebih dan retak pada permukaan. Oleh karena itu, analisis kondisi tanah dasar menjadi dasar dalam merancang perkerasan kaku yang tahan lama dan efisien secara biaya, sekaligus memastikan performa optimal sepanjang umur layanan jalan.

c. Memilih Nilai Faktor Reliabilitas ( $Z_r$ ) dan Kualitas Beton

Pada metode AASHTO untuk perancangan perkerasan kaku, pemilihan nilai faktor reliabilitas ( $Z_r$ ) merupakan langkah penting untuk memastikan keamanan dan ketahanan jalan terhadap kegagalan. Faktor reliabilitas ini mencerminkan tingkat risiko kegagalan yang dapat diterima dalam desain perkerasan. Nilai  $Z_r$  biasanya ditentukan berdasarkan pentingnya jalan, volume lalu lintas, serta konsekuensi jika terjadi kerusakan. Jalan dengan lalu lintas tinggi atau fungsi strategis memerlukan nilai reliabilitas yang lebih tinggi untuk mengurangi kemungkinan kegagalan.

Kualitas beton juga menjadi pertimbangan utama dalam perancangan. Beton dengan kualitas tinggi memiliki modulus elastisitas yang lebih baik, daya tahan retak lebih tinggi, serta umur layanan yang lebih panjang. Dalam metode AASHTO, parameter kualitas beton digunakan untuk menghitung kebutuhan ketebalan slab dan memperkirakan umur layanan perkerasan kaku. Kombinasi antara  $Z_r$  yang tepat dan kualitas beton yang optimal akan menghasilkan desain perkerasan yang aman, efisien, dan ekonomis.

d. Perhitungan Ketebalan Slab Beton

Perhitungan ketebalan slab beton dalam metode AASHTO untuk perancangan perkerasan kaku dilakukan dengan menggunakan persamaan empiris yang dikembangkan berdasarkan penelitian lapangan dan laboratorium. Persamaan ini mempertimbangkan berbagai faktor penting seperti jumlah ESAL (*Equivalent Single Axle Load*), kualitas tanah dasar (modulus reaksi tanah  $k$  atau modulus reaksi tanah dasar  $MR$ ), faktor reliabilitas ( $Z_r$ ), kualitas beton, serta kondisi lingkungan seperti suhu dan drainase. Hasil perhitungan ini menjadi dasar menentukan ketebalan slab yang memadai untuk menahan beban lalu lintas selama umur desain yang diharapkan.

Perancangan perkerasan kaku saat ini banyak dilakukan dengan bantuan perangkat lunak desain yang mengimplementasikan metode AASHTO. Perangkat lunak ini mempermudah analisis dengan kemampuan memproses data lalu lintas, material, dan kondisi lingkungan secara komprehensif. Dengan pendekatan ini, perhitungan ketebalan slab beton menjadi lebih akurat, efisien, dan dapat disesuaikan dengan kondisi proyek, sehingga menghasilkan desain perkerasan yang lebih optimal dan ekonomis.

## 2. Metode PCA untuk Perancangan Perkerasan Kaku

Metode PCA merupakan pendekatan desain empiris yang dikembangkan oleh *Portland Cement Association*. Metode ini didasarkan pada pengalaman panjang dalam konstruksi perkerasan beton di Amerika Serikat. PCA menyediakan panduan desain sederhana berdasarkan tabel ketebalan slab beton untuk berbagai kondisi lalu lintas dan tanah dasar. Metode ini lebih sederhana dibandingkan AASHTO karena mengandalkan tabel empiris dan diagram desain, sehingga memudahkan proses perencanaan.

PCA menggunakan persamaan yang dikembangkan dari data pengujian lapangan, dengan fokus pada dua faktor utama:

- Jumlah ESAL (*Equivalent Single Axle Load*)
- Kondisi Tanah Dasar (*Subgrade Support*)

PCA menyediakan tabel ketebalan slab beton yang mempermudah proses desain, tanpa harus melakukan perhitungan mekanis yang rumit.

Berikut contoh tabel desain PCA untuk ketebalan slab beton berdasarkan jumlah ESAL dan kondisi tanah dasar:

Tabel 13. Contoh Desain PCA

<b>ESAL (x10<sup>6</sup>)</b>	<b>Kondisi Tanah Dasar Baik</b>	<b>Kondisi Tanah Dasar Sedang</b>	<b>Kondisi Tanah Dasar Buruk</b>
1	150 mm	170 mm	200 mm
3	180 mm	200 mm	230 mm
10	220 mm	240 mm	270 mm
30	270 mm	290 mm	320 mm

(Tabel ini adalah ilustrasi sederhana. Data sesungguhnya tersedia pada publikasi PCA).

Keunggulan Metode PCA:

- a. Sederhana dan mudah digunakan.
- b. Tidak memerlukan perhitungan rumit.
- c. Cocok untuk desain awal dan proyek dengan data terbatas.

Kelemahan Metode PCA:

- a. Tidak mempertimbangkan semua variabel teknis seperti faktor iklim dan reliabilitas desain.
- b. Kurang fleksibel untuk kondisi unik atau ekstrim.

### 3. Perbandingan Metode AASHTO dan PCA

Tabel 14. Perbandingan Metode AASHTO dan PCA

<b>Aspek</b>	<b>Metode AASHTO</b>	<b>Metode PCA</b>
Basis Metode	Mekanis-empiris	Empiris
Data yang Dibutuhkan	ESAL, kondisi tanah dasar, iklim	ESAL, kondisi tanah dasar
Kompleksitas	Tinggi	Rendah
Faktor Lingkungan	Dipertimbangkan	Tidak selalu dipertimbangkan
Akurasi	Tinggi (untuk data lengkap)	Sedang
Kemudahan Penggunaan	Membutuhkan software/desain manual	Tabel dan diagram desain sederhana

## D. Desain Sendi dan Dowel

Pada perkerasan kaku (*rigid pavement*), sendi (*joints*) dan dowel merupakan elemen desain kritis yang berfungsi untuk mengontrol retak akibat penyusutan beton dan perubahan suhu, serta untuk memastikan transfer beban antar slab beton. Desain sendi dan dowel yang tepat akan meningkatkan umur layanan perkerasan, mengurangi distress seperti faulting dan corner breaks, serta meminimalkan biaya pemeliharaan. Desain sendi dan dowel merupakan bagian integral dari semua jenis rigid pavement, baik itu *Jointed Plain Concrete Pavement* (JPCP), *Jointed Reinforced Concrete Pavement* (JRCP), maupun *Continuously Reinforced Concrete Pavement* (CRCP) (Huang, 2004).

### 1. Fungsi Sendi dalam Perkerasan Kaku

Sendi adalah pemisah terencana pada slab beton yang berfungsi untuk:

- a. Mengontrol Retak Beton: Beton memiliki sifat penyusutan akibat hidrasi semen dan perubahan suhu. Penyusutan ini akan menimbulkan retak alami jika tidak dikontrol. Sendi memandu posisi retak tersebut agar terjadi pada lokasi yang diinginkan.
- b. Mengakomodasi Perubahan Panjang Beton: Perubahan suhu dan kelembaban menyebabkan ekspansi dan kontraksi slab beton. Sendi menyediakan ruang ekspansi (*expansion joints*) atau kontraksi (*contraction joints*).
- c. Memfasilitasi Transfer Beban: Sendi dilengkapi dowel untuk menyalurkan beban dari slab yang satu ke slab lainnya sehingga distribusi tegangan menjadi merata.

### 2. Jenis Sendi pada Rigid Pavement

Berdasarkan fungsi dan konstruksi, sendi dapat dibedakan menjadi:

- a. *Contraction Joints* (Sendi Penyusutan): Sendi yang dibuat untuk mengontrol retak akibat penyusutan beton.
  - 1) Biasanya berupa potongan permukaan slab beton pada jarak tertentu.
  - 2) Dilengkapi dengan sealant atau filler untuk mencegah masuknya air dan material ke dalam sendi.

- b. *Construction Joints* (Sendi Konstruksi): Sendi yang dibuat ketika proses pengecoran beton dilakukan dalam beberapa tahap.
  - 1) Lokasi sendi konstruksi biasanya direncanakan berdasarkan batas pekerjaan harian.
  - 2) Penting untuk memastikan integritas struktural pada area sambungan.
- c. *Expansion Joints* (Sendi Ekspansi): Sendi yang digunakan untuk mengakomodasi perubahan panjang slab beton akibat perubahan suhu atau kelembaban.
  - 1) Dilengkapi sealant fleksibel untuk mengakomodasi pergerakan.
  - 2) Umumnya digunakan pada jembatan, struktur besar, dan daerah dengan perubahan suhu ekstrem.

### 3. Desain Sendi pada Rigid Pavement

Desain sendi mencakup tiga aspek utama:

- a. Jarak Sambungan (*Joint Spacing*)

Jarak sambungan pada slab beton mempengaruhi jumlah sambungan dan perilaku retak. Jarak yang optimal akan meminimalkan distress pada slab.

Jarak sambungan pada JPCP umumnya berkisar antara 4,5–6 meter, sedangkan pada JRCP dapat diperpanjang hingga 9–12 meter berkat adanya tulangan.

Persamaan empiris untuk menentukan jarak sambungan:

$$L = C\sqrt{h \cdot k}$$

Dimana:

- L = jarak sambungan
- h = ketebalan slab beton
- k = modulus reaksi tanah dasar
- C = konstanta empiris (nilai umum sekitar 2,4–2,9)

- b. Kedalaman Pemotongan Sendi (*Joint Cut Depth*)

Kedalaman pemotongan sendi pada rigid pavement merupakan aspek penting dalam desain sendi untuk mengendalikan retak alami pada slab beton. Pemotongan ini dilakukan pada tahap konstruksi awal dengan tujuan mengarahkan terjadinya retak pada lokasi yang telah ditentukan, sehingga kerusakan tidak

menyebar secara acak dan mengganggu struktur perkerasan. Umumnya, kedalaman pemotongan sendi berkisar antara 25–30% dari ketebalan slab beton, nilai yang ditentukan berdasarkan analisis tegangan tarik dan kondisi lapangan. Dengan pemotongan sendi yang tepat, umur layanan perkerasan dapat diperpanjang dan biaya pemeliharaan dapat ditekan.

c. Sealant Sendi

Sealant sendi pada rigid pavement berperan penting dalam melindungi struktur beton dari penetrasi air, debu, dan material lain yang dapat merusak lapisan perkerasan. Dengan menutup sendi secara efektif, sealant membantu mencegah masuknya kelembaban yang dapat mengurangi kekakuan tanah dasar dan mempercepat kerusakan seperti faulting atau pumping. Sealant juga harus memiliki sifat elastis yang mampu menyesuaikan diri terhadap deformasi akibat perubahan suhu dan pergerakan slab beton, sehingga mempertahankan integritas perkerasan sepanjang umur layanannya. Pemilihan material sealant yang tepat sangat menentukan kinerja jangka panjang perkerasan.

#### 4. Fungsi dan Desain Dowel

a. Fungsi Dowel

Dowel adalah batang baja atau tulangan yang diletakkan melintang pada sendi slab beton untuk:

- 1) Memfasilitasi transfer beban antar slab beton.
- 2) Mengurangi deformasi relatif antar slab (*faulting*).
- 3) Mempertahankan keselarasan slab beton saat terjadi pergerakan.

b. Spesifikasi Dowel

Berdasarkan PCA (2017) dan AASHTO (2004), spesifikasi dowel yang umum digunakan:

- 1) Diameter: 25–32 mm
- 2) Panjang: minimal 400 mm
- 3) Jarak antar dowel: 300–450 mm
- 4) Lapisan pelindung terhadap korosi (misalnya galvanisasi)

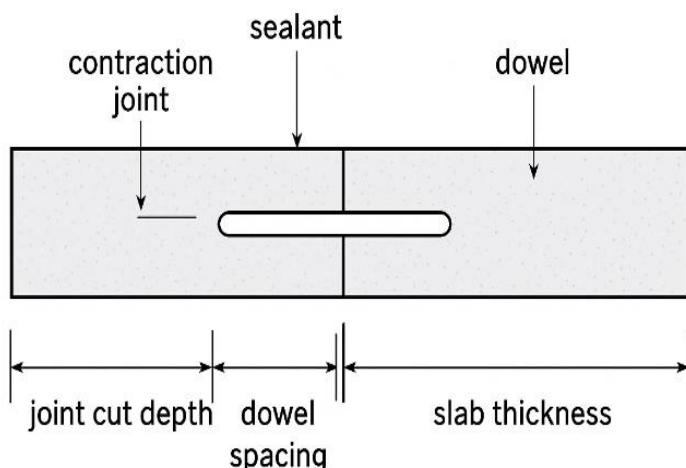
c. Penempatan Dowel

Penempatan dowel pada perkerasan kaku dilakukan secara strategis pada sambungan transversal untuk memastikan distribusi beban yang merata antar slab beton. Dowel diposisikan

secara simetris sehingga setiap slab dapat menyalurkan beban ke slab di sebelahnya dengan efektif, mengurangi konsentrasi tegangan pada area sambungan. Penempatan yang tepat juga membantu meminimalkan perbedaan pergerakan slab akibat perubahan suhu dan beban lalu lintas. Dengan demikian, dowel tidak hanya meningkatkan kapasitas dukung struktur perkerasan tetapi juga memperpanjang umur layanan jalan dengan mengurangi risiko kerusakan pada sambungan beton.

## 5. Desain Sendi dan Dowel: Pendekatan Praktis

### DESAIN SENDI DAN DOWEL



Langkah desain:

- 1) Tentukan jarak sambungan berdasarkan ketebalan slab beton dan kondisi tanah dasar.
- 2) Tentukan kedalaman pemotongan sendi (sekitar 25–30% ketebalan slab beton).
- 3) Tentukan diameter, panjang, dan jarak antar dowel.
- 4) Pastikan sealant dan filler yang digunakan sesuai kondisi lingkungan.

Tabel 15. Rekomendasi Jarak Sambungan dan Spesifikasi Dowel

Jenis Slab	Jarak Sambungan (m)	Kedalaman Pemotongan Sendi (mm)	Diameter Dowel (mm)	Jarak Dowel (mm)
JPCP	4,5–6	25–30% ketebalan slab	25–32	300–450
JRCP	6–12	25–30% ketebalan slab	25–32	300–450
CRCP	Tidak ada sambungan	Tidak berlaku	Tidak berlaku	Tidak berlaku

## 6. Faktor yang Mempengaruhi Desain Sendi dan Dowel

Beberapa faktor penting yang mempengaruhi desain sendi dan dowel pada rigid pavement:

- Lalu lintas desain: Volume dan proporsi kendaraan berat menentukan kebutuhan dowel yang optimal.
- Kondisi tanah dasar: Tanah dasar lunak memerlukan jarak sambungan yang lebih pendek dan penambahan dowel.
- Kondisi iklim: Suhu ekstrem mempengaruhi ekspansi/kontraksi slab beton dan memerlukan desain sendi yang sesuai.
- Kualitas bahan: Beton berkualitas tinggi dapat menahan tegangan lebih baik dan mengurangi kebutuhan sambungan yang rapat.

## E. Kontrol Retak dan Deformasi

Perkerasan kaku (*rigid pavement*) memiliki keunggulan dalam hal kapasitas penyaluran beban dibandingkan perkerasan lentur. Namun, perkerasan kaku rentan terhadap retak dan deformasi yang muncul akibat pengaruh beban lalu lintas, perubahan suhu, kelembaban, serta kondisi tanah dasar. Retak dan deformasi dapat menurunkan kinerja struktural perkerasan dan memperpendek umur layanan jalan (Niken et al., 2020). Kontrol retak dan deformasi merupakan bagian penting dalam desain perkerasan kaku. Proses ini memerlukan pendekatan desain yang menyeluruh, termasuk optimasi geometri slab, desain sendi (*joints*), penggunaan dowel, pemilihan bahan, serta teknik konstruksi dan pemeliharaan yang tepat.

## 1. Penyebab Retak dan Deformasi pada Perkerasan Kaku

Retak dan deformasi pada perkerasan kaku dapat terjadi akibat beberapa faktor:

a. Penyusutan Beton (*Shrinkage*)

Penyusutan beton (*shrinkage*) terjadi akibat proses hidrasi semen dan hilangnya kelembaban dari campuran beton selama pengerasan. Proses ini menyebabkan volume beton berkurang, menghasilkan tegangan tarik internal yang, jika melebihi kekuatan tarik beton, akan menimbulkan retak pada struktur perkerasan. Retak akibat penyusutan dapat terjadi baik pada tahap awal pengerasan maupun selama umur layanan, terutama jika kontrol kelembaban dan perawatan beton tidak memadai. Faktor lingkungan seperti suhu tinggi, kelembaban rendah, dan kecepatan pengeringan mempercepat penyusutan, sehingga penting untuk mempertimbangkan metode perancangan dan perawatan beton untuk meminimalkan retak shrinkage.

b. Perubahan Suhu (*Temperature Effects*)

Perubahan suhu pada perkerasan kaku menyebabkan beton mengalami ekspansi saat suhu meningkat dan kontraksi saat suhu menurun. Perbedaan suhu yang signifikan, baik secara harian maupun musiman, dapat menimbulkan tegangan tarik pada beton. Jika tegangan ini melebihi kekuatan tarik beton, retak termal (*thermal cracking*) akan terjadi, yang dapat mengurangi umur layanan perkerasan. Untuk mengantisipasi fenomena ini, desain rigid pavement harus mempertimbangkan faktor iklim, penggunaan bahan beton dengan koefisien ekspansi termal rendah, serta penerapan desain sendi yang tepat untuk mengakomodasi pergerakan beton akibat perubahan suhu.

c. Beban Lalu Lintas (*Traffic Loading*)

Beban lalu lintas, khususnya dari kendaraan berat, memberikan tekanan signifikan pada permukaan slab beton. Tekanan ini menimbulkan tegangan internal yang berulang setiap kali kendaraan melintas. Seiring waktu, beban berulang tersebut dapat menyebabkan retak fatigue (*fatigue cracking*) pada beton, yang biasanya dimulai dari bagian bawah slab dan berkembang ke permukaan. Selain itu, tekanan yang terus-menerus juga dapat memicu deformasi permanen pada beton, terutama jika kualitas material atau ketebalan slab tidak memadai. Oleh karena itu,

dalam desain rigid pavement, faktor beban lalu lintas harus diperhitungkan secara cermat untuk memastikan daya tahan dan umur layanan yang optimal (Su et al., 2017).

d. Kondisi Tanah Dasar (*Subgrade Conditions*)

Kondisi tanah dasar yang tidak seragam, seperti variasi kepadatan atau kelembaban, dapat menimbulkan masalah serius pada perkerasan kaku. Perbedaan sifat tanah di bawah slab beton menyebabkan deformasi diferensial, di mana bagian slab bergerak atau mengendap tidak merata. Fenomena ini menghasilkan konsentrasi tegangan pada titik tertentu yang memicu retak, seperti corner breaks, atau pergeseran pada sambungan slab yang dikenal sebagai faulting. Kondisi tersebut dapat mempercepat degradasi struktural perkerasan dan mengurangi umur layanan jalan. Oleh sebab itu, analisis dan perbaikan subgrade menjadi langkah krusial dalam desain rigid pavement.

e. Faktor Konstruksi dan Material

Faktor konstruksi dan kualitas material memiliki peran penting dalam ketahanan perkerasan kaku. Kesalahan selama proses konstruksi, seperti penggunaan beton dengan mutu rendah, pencampuran yang tidak tepat, atau curing yang kurang baik, dapat menurunkan kekuatan beton dan meningkatkan risiko retak. Selain itu, penempatan dowel yang tidak akurat dan desain sendi yang kurang optimal akan menyebabkan distribusi beban yang tidak merata, memicu deformasi dan retak lebih cepat. Oleh karena itu, pengendalian mutu konstruksi dan pemilihan material yang tepat menjadi kunci untuk memastikan umur layanan perkerasan kaku sesuai desain.

## 2. Strategi Kontrol Retak

Kontrol retak pada perkerasan kaku dilakukan melalui langkah desain, konstruksi, dan pemeliharaan yang terpadu. Strategi kontrol retak dapat dibagi menjadi:

a. Desain Geometri Slab Beton

- 1) Ketebalan slab beton: Penentuan ketebalan slab yang optimal sangat penting untuk meminimalkan tegangan tarik akibat beban lalu lintas dan perubahan suhu.

- 2) Ukuran slab: Jarak sambungan (*joint spacing*) harus dioptimalkan untuk mengendalikan retak. Jarak sambungan pada JPCP biasanya berkisar 4,5–6 meter, sementara pada JRCP dapat mencapai 9–12 meter.
- b. Desain Sendi dan Dowel  
Sendi beton dan dowel berfungsi untuk mengontrol posisi retak dan memastikan distribusi beban yang merata.
  - 1) Sendi potong (*contraction joints*) ditempatkan pada interval tertentu untuk mengarahkan retak pada lokasi yang diinginkan.
  - 2) Dowel bars digunakan untuk memastikan transfer beban antar slab dan mengurangi deformasi (*faulting*).
- c. Pemilihan Material Beton  
Kualitas beton mempengaruhi kecenderungan retak. Beton dengan kekuatan tinggi, modulus elastis tinggi, dan koefisien penyusutan rendah memiliki ketahanan retak yang lebih baik. Modifikasi beton dengan bahan tambahan seperti fly ash, silica fume, atau serat beton (*fiber reinforced concrete*) juga efektif untuk mengontrol retak.
- d. Teknik Konstruksi  
Proses konstruksi harus memastikan:
  - 1) Penempatan beton yang tepat tanpa segregasi material.
  - 2) Kontrol kelembaban dan suhu selama proses curing beton untuk mengurangi penyusutan awal.
  - 3) Pemotongan sendi tepat waktu untuk memastikan retak terjadi pada lokasi yang diinginkan.

### 3. Strategi Kontrol Deformasi

Deformasi pada rigid pavement biasanya muncul dalam bentuk faulting, corner breaks, atau deformasi permanen (*permanent deformation*). Strategi pengendalian deformasi meliputi:

- a. Penentuan Ketebalan Slab Beton  
Penentuan ketebalan slab beton merupakan aspek krusial dalam desain perkerasan kaku untuk memastikan kemampuan struktur menahan beban lalu lintas sepanjang umur layanan. Ketebalan slab yang sesuai dapat mengurangi tegangan tarik pada permukaan bawah beton, sehingga meminimalkan risiko retak dan deformasi. Faktor yang mempengaruhi ketebalan meliputi

intensitas dan jenis lalu lintas, modulus elastisitas beton, serta kondisi tanah dasar sebagai pondasi (Huang, 2004).

Jika slab beton terlalu tipis, beban lalu lintas akan menimbulkan regangan berlebih yang dapat mempercepat terjadinya retak fatigue dan deformasi permanen pada perkerasan. Sebaliknya, slab yang terlalu tebal akan meningkatkan biaya konstruksi tanpa memberikan peningkatan proporsional terhadap kinerja. Oleh karena itu, perancangan ketebalan slab beton harus dilakukan dengan perhitungan yang cermat, mempertimbangkan analisis mekanistik dan data kondisi lapangan untuk menghasilkan desain yang optimal dari segi biaya dan ketahanan.

b. Perbaikan Tanah Dasar

Perbaikan tanah dasar (*subgrade improvement*) merupakan strategi penting dalam mengendalikan deformasi pada perkerasan jalan. Salah satu metode utama adalah stabilisasi tanah dengan menambahkan bahan seperti kapur, semen, atau fly ash. Proses ini meningkatkan kekuatan tanah dasar, mengurangi plastikitas, dan meningkatkan modulus elastisitasnya, sehingga mampu menahan beban lalu lintas lebih baik. Stabilisasi tanah juga membantu mengurangi penetrasi air ke lapisan perkerasan, yang berperan penting dalam mempertahankan daya dukung struktur jalan.

Penguatan subgrade dapat dilakukan menggunakan geosintetik seperti geotextile atau geogrid, serta lapisan base/subbase yang kuat. Geosintetik bekerja memperkuat struktur tanah, mendistribusikan beban secara lebih merata, dan mengurangi deformasi diferensial. Lapisan base dan subbase yang baik juga berfungsi sebagai lapisan penopang yang efektif, membantu menahan tekanan lalu lintas serta memperpanjang umur layanan perkerasan. Strategi ini menjadi kunci dalam memastikan stabilitas dan keandalan jalan jangka panjang.

c. Desain Drainase yang Efektif

Desain drainase yang efektif merupakan elemen krusial dalam strategi kontrol deformasi perkerasan, khususnya pada perkerasan kaku. Air tanah yang berlebih di bawah slab beton dapat menurunkan kekuatan subgrade dan menyebabkan deformasi diferensial seperti faulting atau corner breaks. Untuk itu, sistem drainase harus dirancang sedemikian rupa agar

mampu mengalirkan air secara cepat dan efisien, sehingga kelembaban tanah dasar tetap terkendali.

Penerapan drainase yang baik meliputi pembuatan saluran permukaan, pemasangan lapisan permeabel pada base atau subbase, serta sistem drainase lateral yang memadai. Penempatan drainase harus mempertimbangkan kemiringan permukaan jalan dan arah aliran air untuk memastikan efektivitasnya. Dengan demikian, desain drainase yang optimal tidak hanya memperpanjang umur layanan perkerasan tetapi juga mengurangi biaya pemeliharaan jangka panjang. Strategi ini menjadi bagian integral dari perencanaan infrastruktur jalan yang tahan lama.

d. Penempatan Dowel dan Tie Bars

Penempatan dowel dan tie bars merupakan strategi penting dalam mengendalikan deformasi pada perkerasan kaku. Dowel berfungsi sebagai elemen transfer beban antar slab beton pada sambungan transversal, sehingga membantu mendistribusikan tekanan secara merata dan mengurangi konsentrasi tegangan yang dapat menyebabkan retak atau penurunan permukaan. Tie bars, di sisi lain, menjaga keselarasan slab pada sambungan longitudinal dan mencegah pergeseran lateral akibat beban lalu lintas berulang.

Penempatan dowel dan tie bars harus mempertimbangkan ukuran, jarak, dan kedalaman pemasangan sesuai standar desain. Penempatan yang tepat memastikan slab beton bekerja secara integratif dalam menahan beban, sehingga memperpanjang umur layanan perkerasan. Kesalahan dalam penempatan dapat menyebabkan deformasi lokal, peningkatan retak, atau penurunan kinerja struktur jalan secara keseluruhan.

#### 4. Teknik Evaluasi Kontrol Retak dan Deformasi

Evaluasi kontrol retak dan deformasi dilakukan baik pada tahap desain maupun pemeliharaan:

a. Evaluasi pada Tahap Desain

- 1) Analisis mekanis-empiris seperti metode AASHTO untuk memprediksi ketebalan slab beton dan jarak sambungan.
- 2) Simulasi numerik menggunakan software analisis struktur seperti ABAQUS atau Pavement ME Design.

- b. Evaluasi pada Tahap Pemeliharaan
  - 1) Inspeksi visual retak dan deformasi.
  - 2) Pengukuran faulting dengan profilometer atau profil leveling.
  - 3) Monitoring kondisi lapisan beton dan subgrade secara berkala.

## 5. Teknologi dan Inovasi dalam Kontrol Retak dan Deformasi

Perkembangan teknologi pada dekade terakhir membawa inovasi dalam pengendalian retak dan deformasi rigid pavement:

- a. Beton dengan Serat (*Fiber Reinforced Concrete*)

Beton dengan serat (*Fiber Reinforced Concrete/FRC*) merupakan inovasi penting dalam mengendalikan retak dan deformasi pada perkerasan kaku. Penambahan serat baja, polimer, atau material sintetis lainnya ke dalam campuran beton meningkatkan kapasitas tarik beton, sehingga dapat menahan tegangan tarik yang timbul akibat penyusutan, perubahan suhu, dan beban lalu lintas berulang. Serat-serat ini bekerja seperti jaring penguat internal yang menahan penyebaran retak mikro, sehingga meningkatkan durabilitas dan umur layanan beton.

FRC juga meningkatkan kapasitas deformasi beton tanpa kehilangan kekuatannya. Penggunaan serat memungkinkan beton mempertahankan integritas struktural meskipun terjadi retak kecil, sehingga mengurangi kebutuhan perawatan dan perbaikan. Teknologi ini sangat relevan untuk perkerasan jalan yang menghadapi beban lalu lintas tinggi dan kondisi iklim ekstrem, karena secara signifikan dapat memperpanjang umur layanan perkerasan dan menurunkan biaya pemeliharaan jangka panjang.

- b. Geosintetik untuk Penguatan Subgrade

Penggunaan geosintetik pada lapisan subgrade merupakan strategi inovatif untuk meningkatkan kinerja perkerasan kaku. Geosintetik seperti geotextile dan geogrid berfungsi memperkuat tanah dasar dengan mendistribusikan beban lalu lintas secara merata, sehingga mengurangi konsentrasi tegangan pada subgrade. Hal ini berdampak langsung pada penurunan deformasi slab beton dan memperpanjang umur layanan perkerasan. Selain itu, geosintetik juga membantu menjaga

kestabilan struktur lapisan bawah dengan mengurangi pergerakan partikel tanah akibat beban berulang.

Penggunaan geosintetik pada subgrade juga memberikan manfaat drainase yang signifikan. Material geosintetik dapat membantu mengalirkan air keluar dari struktur perkerasan sehingga kelembaban tanah dasar tetap terkendali. Kondisi subgrade yang lebih kering akan mempertahankan kekakuan tanah dan mencegah penurunan kapasitas dukung akibat saturasi.

c. Monitoring Struktural Digital

Monitoring struktural digital merupakan terobosan penting dalam upaya mengendalikan retak dan deformasi pada perkerasan kaku. Teknologi *Structural Health Monitoring* (SHM) memanfaatkan sensor pintar yang terintegrasi pada slab beton untuk memantau kondisi struktural secara real-time. Sensor ini mampu mendeteksi perubahan tegangan, regangan, retak, dan deformasi akibat beban lalu lintas maupun perubahan lingkungan. Data yang diperoleh kemudian dianalisis untuk menilai kesehatan struktural perkerasan sehingga memungkinkan identifikasi dini terhadap potensi kerusakan.

Pendekatan monitoring ini mendukung strategi pemeliharaan prediktif, bukan hanya reaktif. Dengan data yang akurat dan terkini, pengelola jalan dapat merencanakan perbaikan sebelum kerusakan menjadi parah, sehingga menghemat biaya dan memperpanjang umur layanan jalan. Selain itu, penggunaan sistem digital ini memungkinkan integrasi dengan perangkat lunak desain dan manajemen infrastruktur, meningkatkan efisiensi dan efektivitas pengelolaan perkerasan jalan secara keseluruhan.





# BAB VII

# KONSTRUKSI

# PERKERASAN

---

Konstruksi perkerasan jalan merupakan tahap kritis yang menentukan keberhasilan penerapan desain teknis menjadi infrastruktur nyata. Tahapan konstruksi tidak hanya melibatkan pelaksanaan teknis sesuai rencana, tetapi juga pengelolaan sumber daya, pemilihan metode kerja, dan pengendalian mutu yang ketat. Proses konstruksi yang baik memastikan bahwa perkerasan memiliki daya tahan yang optimal terhadap beban lalu lintas dan kondisi lingkungan. Bab ini membahas prinsip-prinsip dasar konstruksi perkerasan serta berbagai tahapan yang harus dilalui agar hasil akhir sesuai dengan spesifikasi teknis dan standar yang berlaku.

Bab ini membahas tahapan konstruksi perkerasan lentur dan kaku, mulai dari persiapan lapangan, stabilisasi tanah dasar, pemasangan lapisan agregat, hingga pelapisan akhir dengan material pengikat seperti aspal atau beton. Selain itu, bab ini menjelaskan standar dan spesifikasi teknis yang menjadi pedoman, penggunaan alat dan mesin konstruksi, serta manajemen mutu konstruksi. Pendekatan ini menjamin bahwa proses konstruksi tidak hanya efisien secara waktu dan biaya, tetapi juga menghasilkan perkerasan dengan kinerja yang optimal dan umur layanan yang panjang.

## A. Tahapan Konstruksi Perkerasan Lentur

Perkerasan lentur (*flexible pavement*) adalah struktur jalan yang terdiri dari lapisan-lapisan material agregat dan lapisan permukaan beraspal yang bekerja bersama-sama untuk menahan beban lalu lintas. Keunggulan perkerasan lentur adalah kemampuannya untuk menyesuaikan dengan kondisi tanah dasar dan distribusi beban secara

fleksibel. Tahapan konstruksi perkerasan lentur meliputi serangkaian proses yang saling terkait, mulai dari persiapan lahan, pemasatan tanah dasar, pelapisan agregat, hingga pengcoran lapisan permukaan beraspal. Setiap tahapan harus dilaksanakan sesuai standar teknis agar kinerja dan umur layanan perkerasan lentur optimal (Krisdiyanto et al., 2022). Tahapan konstruksi perkerasan lentur umumnya meliputi langkah-langkah berikut:

### 1. Persiapan Lahan dan Tanah Dasar (*Subgrade Preparation*)

Persiapan lahan adalah tahap awal yang sangat penting untuk menjamin stabilitas perkerasan lentur. Tahap ini mencakup:

- a. Pembersihan Lahan: Menghilangkan vegetasi, batu besar, atau material yang tidak stabil.
- b. Pemotongan atau Penimbunan Tanah: Untuk mendapatkan elevasi sesuai desain.
- c. Pemasatan Tanah Dasar: Pemasatan subgrade menggunakan alat berat seperti roller untuk mendapatkan kepadatan optimum dan modulus reaksi tanah yang sesuai (*subgrade modulus*).
- d. Pengujian Kualitas Tanah Dasar: Meliputi uji CBR (*California Bearing Ratio*), kepadatan, kadar air, dan sifat mekanik tanah dasar.

Tabel 16. Standar Persyaratan Tanah Dasar untuk Perkerasan Lentur

Parameter	Nilai Minimum
CBR (%)	$\geq 5\%$
Kepadatan relatif (%)	$\geq 95\%$
Kadar air optimum (%)	Sesuai CBR test
Modulus reaksi tanah (MPa)	$\geq 50$

(Data referensi: Kementerian PUPR, 2017)

### 2. Pemasangan Lapisan Pondasi (*Base Course*)

Lapisan pondasi berfungsi untuk menyalurkan beban lalu lintas ke tanah dasar secara merata. Tahapan pemasangan base course meliputi:

- a. Pemilihan Material: Base course biasanya terbuat dari agregat bergradasi baik dengan kualitas tinggi (misalnya *crushed stone* atau *gravel*).
- b. Pemasatan: Lapisan base course dipadatkan dengan roller hingga mencapai kepadatan optimum.

- c. Pengujian: Pengujian kualitas agregat dan kepadatan lapisan dilakukan secara berkala.

Ketebalan base course pada perkerasan lentur bervariasi antara 150–300 mm tergantung kondisi lalu lintas dan kualitas tanah dasar.

### 3. Pemasangan Lapisan Subbase

Lapisan subbase ditempatkan di atas tanah dasar dan di bawah base course. Fungsi utama lapisan ini adalah:

- a. Mendistribusikan beban ke lapisan di bawahnya.
- b. Mengurangi tekanan langsung pada tanah dasar.
- c. Memberikan drainase yang baik untuk melindungi struktur jalan.

Material subbase biasanya terdiri dari material granular yang memiliki sifat drainase baik, seperti crushed aggregate. Ketebalan lapisan subbase biasanya berkisar antara 100–200 mm.

### 4. Pemasangan Lapisan Permukaan (*Surface Course*)

Lapisan permukaan adalah lapisan paling atas yang langsung berinteraksi dengan lalu lintas. Pada perkerasan lentur, lapisan ini biasanya menggunakan hot mix asphalt (HMA). Tahapan pemasangan lapisan permukaan meliputi:

- a. Pengangkutan dan Penempatan Material: Aspal panas diangkut dengan truk aspal dan ditempatkan menggunakan paver machine.
- b. Pemadatan Lapisan Aspal: Dilakukan dengan roller sampai mencapai kepadatan yang sesuai standar.
- c. Pengujian Kualitas Lapisan: Termasuk pengujian ketebalan, kepadatan, dan kualitas aspal.

Ketebalan lapisan permukaan HMA pada perkerasan lentur umumnya berkisar antara 50–100 mm untuk jalan arteri dan hingga 150 mm untuk jalan tol.

## B. Tahapan Konstruksi Perkerasan Kaku

Perkerasan kaku (*rigid pavement*) adalah struktur jalan yang umumnya menggunakan beton bertulang atau beton biasa sebagai lapisan permukaan. Perkerasan ini memiliki kapasitas daya dukung yang tinggi, umur layanan yang panjang, dan kinerja baik terhadap beban lalu lintas berat. Namun, konstruksinya memerlukan prosedur yang lebih teliti dibandingkan perkerasan lentur karena beton lebih sensitif terhadap retak, deformasi, dan cacat akibat kesalahan konstruksi (PCA, 2017).

Tahapan konstruksi perkerasan kaku melibatkan persiapan subgrade, pemasangan lapisan subbase dan base course (jika diperlukan), pengecoran beton, pengerajan sendi, curing, dan finishing permukaan. Proses ini harus dilakukan dengan standar teknis tinggi agar perkerasan memiliki kinerja optimal dan umur layanan yang panjang. Tahapan konstruksi perkerasan kaku secara umum meliputi beberapa langkah utama, yaitu:

## 1. Persiapan Lahan dan Subgrade

Tahap awal ini adalah fondasi keberhasilan konstruksi rigid pavement. Persiapan subgrade meliputi:

- a. Pembersihan lokasi: Menghilangkan vegetasi, material organik, atau struktur lama yang tidak diperlukan.
- b. Pemotongan/pengurukan tanah: Menyesuaikan elevasi sesuai desain.
- c. Pemadatan tanah dasar: Dilakukan dengan roller atau alat pemat dat lainnya untuk mencapai kepadatan optimum.
- d. Pengujian tanah: Meliputi uji CBR (*California Bearing Ratio*), kadar air optimum, kepadatan relatif, dan modulus reaksi tanah.

Tabel 17. Persyaratan Minimum Tanah Dasar untuk Perkerasan Kaku

Parameter	Nilai Minimum
CBR (%)	$\geq 5\%$
Kepadatan relatif (%)	$\geq 95\%$
Kadar air optimum (%)	Sesuai uji CBR
Modulus reaksi tanah (MPa)	$\geq 50$

## 2. Pemasangan Lapisan Subbase dan Base Course

Walaupun perkerasan kaku memiliki daya dukung yang tinggi, lapisan subbase dan base course sering diperlukan untuk:

- a. Menyediakan lapisan pendukung bagi beton.
- b. Memberikan drainase yang baik untuk mencegah kelembaban berlebih pada subgrade.
- c. Menyebarkan beban lalu lintas secara merata.

Tahapan pemasangan meliputi:

- 1) Penentuan ketebalan lapisan berdasarkan desain struktur perkerasan.

- 2) Pemilihan material agregat bergradasi baik (*well-graded aggregate*).
- 3) Pemadatan lapisan subbase/base dengan kepadatan minimum sesuai standar.
- 4) Pengujian kualitas material dan kepadatan lapisan.

Tabel 18. Ketebalan Lapisan Subbase dan Base Course pada Rigid Pavement

Jenis Lapisan	Ketebalan (mm)
Subbase	100–200
Base Course	150–300

### 3. Pemasangan Formwork dan Penentuan Elevasi

Formwork adalah cetakan yang digunakan untuk membatasi bentuk slab beton pada lokasi pengecoran. Tahapan ini meliputi:

- a. Penentuan lokasi formwork sesuai desain.
- b. Pemasangan formwork yang kuat dan stabil.
- c. Pemeriksaan elevasi dan kemiringan formwork untuk memastikan ketebalan slab sesuai spesifikasi desain.

Formwork juga harus cukup kuat untuk menahan tekanan beton basah selama proses pengecoran, serta harus rapi agar hasil permukaan slab baik dan presisi.

### 4. Pengecoran Beton

Pengecoran beton adalah tahap inti konstruksi perkerasan kaku. Proses ini meliputi beberapa sub-tahapan:

- a. Persiapan Beton: Memastikan campuran beton sesuai spesifikasi desain, baik dalam hal kekuatan (*compressive strength*), *workability*, dan durabilitas.
- b. Pengangkutan Beton: Beton harus diangkut dengan metode yang mencegah segregasi dan kehilangan *workability*, menggunakan *transit mixer* atau *ready mix concrete*.
- c. Pengecoran: Beton dituangkan secara seragam dan merata di dalam formwork. Penggunaan *concrete paver* atau metode manual dilakukan tergantung skala proyek.
- d. Pemadatan Beton: Dilakukan dengan vibrator untuk menghilangkan rongga udara, meningkatkan kepadatan, dan memastikan beton mengisi seluruh ruang formwork.

## 5. Pemotongan Sendi (*Joint Cutting*)

Pemotongan sendi adalah tahap penting untuk mengontrol retak beton akibat penyusutan dan perubahan suhu. Jenis sendi yang biasa digunakan:

- a. *Contraction joints*: untuk mengarahkan retak alami pada lokasi tertentu.
- b. *Construction joints*: dibuat saat pengecoran dilakukan secara bertahap.
- c. *Expansion joints*: untuk mengakomodasi ekspansi beton akibat suhu.

Pemotongan sendi biasanya dilakukan dalam 6–18 jam setelah pengecoran beton, tergantung pada kondisi cuaca dan jenis beton.

## 6. Penempatan Dowel Bars dan Tie Bars

Dowel bars digunakan untuk transfer beban antar slab, sedangkan tie bars menjaga keselarasan slab di sambungan. Tahapan ini meliputi:

- a. Penentuan posisi dan kedalaman dowel sesuai desain.
- b. Pemasangan dowel dengan presisi untuk memastikan fungsi transfer beban optimal.

## 7. Pengeraaan Permukaan Beton

Tahap finishing permukaan beton meliputi:

- a. Floating: untuk mendapatkan permukaan beton yang rata.
- b. Trowelling: menghasilkan permukaan akhir yang halus.
- c. Texturing: memberikan tekstur permukaan untuk meningkatkan traksi kendaraan, mengurangi risiko slip, dan mengurangi kebisingan lalu lintas.

## 8. Proses Curing Beton

Curing beton bertujuan menjaga kelembaban beton pada masa awal pengerasan untuk memastikan kekuatan yang optimal. Metode curing antara lain:

- a. Penyemprotan air secara periodik (*wet curing*).
- b. Penggunaan membran curing (*membrane curing compound*).
- c. Penutup dengan kain basah atau plastik.

Curing minimal dilakukan selama 7 hari pada kondisi normal untuk beton perkerasan.

## **9. Pengujian Kualitas Beton dan Perkerasan**

Pengujian dilakukan untuk memastikan kualitas perkerasan kaku sesuai standar, meliputi:

- a. Uji kekuatan tekan beton (*compressive strength test*).
- b. Uji kepadatan dan ketebalan slab beton.
- c. Pemeriksaan kualitas sendi dan dowel.
- d. Pengujian permukaan untuk memastikan tekstur dan rata.

## **C. Standar dan Spesifikasi Teknis**

Standar dan spesifikasi teknis dalam konstruksi perkerasan jalan adalah pedoman yang digunakan untuk memastikan bahwa seluruh proses konstruksi dilakukan dengan kualitas optimal, aman, efisien, dan sesuai dengan desain. Standar ini mencakup persyaratan material, metode konstruksi, prosedur pengujian, dan pengendalian kualitas. Standar ini sangat penting karena perkerasan jalan merupakan elemen infrastruktur strategis yang harus memiliki umur layanan panjang dan performa tinggi. Pelaksanaan konstruksi tanpa standar yang jelas berisiko menghasilkan perkerasan yang cepat rusak, memerlukan perbaikan berulang, dan meningkatkan biaya pemeliharaan jalan secara signifikan. Dalam praktiknya, standar dan spesifikasi teknis perkerasan merujuk pada pedoman internasional seperti AASHTO *Guide for Design of Pavement Structures* (AASHTO, 2004), Manual Desain Perkerasan Jalan Indonesia (Kementerian PUPR, 2017), dan spesifikasi teknis beton dari Portland Cement Association (PCA, 2017).

### **1. Standar dan Spesifikasi Teknis Perkerasan**

#### **a. Standar Perkerasan Lentur**

Perkerasan lentur memiliki karakteristik yang berbeda dengan perkerasan kaku, sehingga memiliki standar teknis tersendiri. Standar ini mencakup:

##### **1) Persyaratan Material**

- a) Aspal: Aspal harus memenuhi spesifikasi dari Standar Nasional Indonesia (SNI) 06-2489-1991 atau SNI terbaru terkait bitumen.
- b) Agregat: Harus memenuhi SNI 03-0691-1996 atau standar terbaru, termasuk kriteria gradasi, kekerasan (*Los Angeles Abrasion Test*), dan sifat daya lekat.

- c) Material Base dan Subbase: Harus memenuhi persyaratan CBR minimum dan kepadatan optimum (AASHTO, 2004).
- 2) Ketebalan Lapisan
- Ketebalan lapisan ditentukan berdasarkan metode desain seperti AASHTO 1993 atau Manual Desain Perkerasan Jalan Indonesia (MDPJ, Kementerian PUPR, 2017). Contoh ketebalan lapisan lentur untuk jalan arteri dengan lalu lintas sedang:
- a) Lapisan permukaan: 50–75 mm
  - b) Base course: 150–200 mm
  - c) Subbase: 100–150 mm
- 3) Kualitas Pemasangan
- a) Pemadatan harus mencapai kepadatan  $\geq 95\%$  dari kepadatan maksimum berdasarkan uji Proctor.
  - b) Ketebalan lapisan harus sesuai dengan desain  $\pm 10\%$ .

Tabel 19. Standar Teknis Perkerasan Lentur (SNI & MDPJ, 2017)

Parameter	Persyaratan
CBR Minimum	$\geq 5\%$
Kepadatan Relatif (%)	$\geq 95\%$
Kadar Aspal (%)	Sesuai campuran desain
Gradasi Agregat	Mengikuti SNI
Ketebalan Lapisan	$\pm 10\%$ dari desain

b. Standar Perkerasan Kaku

Perkerasan kaku memerlukan standar teknis yang lebih ketat karena beton lebih rentan terhadap retak dan deformasi akibat kesalahan konstruksi.

- 1) Persyaratan Material
- a) Beton: Harus memenuhi kekuatan tekan minimum yang ditentukan, biasanya  $\geq 30 \text{ MPa}$  untuk jalan lalu lintas berat (SNI 03-2834-2000 atau revisi terbaru).
  - b) Cement Type: Umumnya Portland Cement dengan mutu tinggi sesuai SNI.
  - c) Air dan Admixtures: Harus sesuai standar campuran beton yang dirancang untuk kinerja perkerasan kaku.

2) Ketebalan Slab Beton

Ketebalan slab beton rigid pavement tergantung pada intensitas lalu lintas, kualitas tanah dasar, dan metode desain. Ketebalan biasanya berkisar antara 200–300 mm untuk jalan nasional atau jalan tol (PCA, 2017).

3) Pemotongan Sendi

- Contraction joints* dibuat pada jarak 4,5–6 m untuk mengendalikan retak termal.
- Expansion joints* ditempatkan pada perbatasan struktur jalan atau jembatan untuk mengakomodasi ekspansi beton.

4) Kualitas Pemasangan

- Curing beton minimal 7 hari pada kondisi normal.
- Pemadatan beton menggunakan vibrator harus merata untuk menghindari rongga udara.
- Ketebalan slab harus sesuai desain ±5 mm.

Tabel 20. Standar Teknis Perkerasan Kaku (SNI & PCA, 2017)

Parameter	Persyaratan
Kekuatan tekan beton	$\geq 30$ MPa
Ketebalan slab	200–300 mm
Pemotongan sendi	Jarak 4,5–6 m
Curing	Minimal 7 hari
Kepadatan beton	$\geq 98\%$ dari teoritis

c. Spesifikasi Umum Konstruksi Perkerasan Jalan

Selain spesifikasi teknis material, konstruksi perkerasan jalan memerlukan spesifikasi umum yang mencakup:

- Persiapan Lokasi: Pembersihan, pemotongan/pengurukan, dan pemandatan tanah dasar.
- Pengendalian Mutu: Pengujian material, kepadatan, ketebalan, dan kualitas permukaan secara berkala.
- Drainase: Desain dan konstruksi sistem drainase untuk mencegah kerusakan perkerasan akibat air.
- Pengendalian Lalu Lintas: Pengaturan lalu lintas selama konstruksi untuk keselamatan kerja.

## 2. Standar Nasional dan Internasional

### a. Standar Nasional Indonesia (SNI)

SNI merupakan acuan teknis utama di Indonesia untuk konstruksi perkerasan jalan. Beberapa SNI terkait perkerasan jalan antara lain:

- 1) SNI 03-2489-1991: Spesifikasi Bitumen.
- 2) SNI 03-0691-1996: Spesifikasi Agregat.
- 3) SNI 03-2834-2000: Beton untuk perkerasan jalan.
- 4) SNI terbaru untuk material, metode konstruksi, dan pengujian.

### b. Standar Internasional

- 1) *AASHTO Guide for Design of Pavement Structures* (2004): Standar utama desain dan konstruksi perkerasan di AS yang diadaptasi di berbagai negara.
- 2) *Portland Cement Association* (PCA) Guidelines: Standar teknis untuk konstruksi rigid pavement.
- 3) ASTM Standards: Standar material dan metode pengujian internasional.

## 3. Pengendalian Mutu dan Inspeksi

Pengendalian mutu dalam konstruksi perkerasan jalan bertujuan memastikan kesesuaian hasil konstruksi dengan spesifikasi teknis. Tahapan pengendalian mutu meliputi:

- a. Pengujian Material: CBR, gradation, *Los Angeles Abrasion Test*, *Marshall Test* (untuk aspal), *compressive strength test* (untuk beton).
- b. Pengujian Lapangan: Uji kepadatan, ketebalan lapisan, dan permukaan jalan.
- c. Pengawasan Konstruksi: Pengawasan berkelanjutan oleh inspektur teknis untuk memastikan prosedur dan spesifikasi dipenuhi.

Tabel 21. Pengujian Mutu Konstruksi Perkerasan Jalan

Jenis Uji	Tujuan
CBR	Menentukan kekuatan tanah dasar
Marshall Stability Test	Menentukan kualitas campuran aspal
Compressive Strength	Menentukan kekuatan beton
Field Density Test	Menentukan kepadatan lapisan
Profilometer	Menentukan kelurusan permukaan

## D. Alat dan Mesin Konstruksi

Konstruksi perkerasan jalan, baik lentur maupun kaku, memerlukan penggunaan alat dan mesin konstruksi yang tepat agar prosesnya berjalan efisien, aman, dan memenuhi standar kualitas. Alat dan mesin konstruksi memiliki peranan vital dalam setiap tahap pekerjaan mulai dari persiapan lahan, pengangkutan material, pemasangan, pengecoran, hingga finishing permukaan jalan. Dalam beberapa dekade terakhir, perkembangan teknologi mesin konstruksi telah memberikan kontribusi signifikan terhadap peningkatan produktivitas dan kualitas konstruksi perkerasan. Teknologi seperti alat pemasangan berbasis sensor (*Intelligent Compaction*), paving machine otomatis, dan beton mixer berkapasitas tinggi telah menjadi standar dalam konstruksi modern (Savan et al., 2016).

### 1. Kategori Alat dan Mesin Konstruksi

Alat dan mesin konstruksi perkerasan dapat dikategorikan berdasarkan fungsi utamanya, yaitu:

a. Alat Persiapan Lahan

Tahap ini meliputi pembersihan lahan, pengurukan/pemotongan tanah, dan pemasangan tanah dasar (subgrade).

- Bulldozer

Fungsi: Pemotongan dan perataan tanah.

Keunggulan: Kapasitas tinggi, efektif untuk area luas.

Contoh: Komatsu D85EX, Caterpillar D6T.

- Excavator

Fungsi: Menggali, memindahkan tanah atau material.

Keunggulan: Fleksibilitas tinggi, cocok untuk area terbatas.

Contoh: Hitachi ZX350LC, Volvo EC220E.

- Motor Grader

Fungsi: Menghaluskan permukaan tanah, mengatur elevasi.

Keunggulan: Akurasi tinggi untuk grading.

Contoh: Caterpillar 140K.

- Roller (Pneumatic, Vibratory, Static)

Fungsi: Pemasangan tanah dasar, base course, subbase.

Keunggulan: Variasi jenis roller sesuai kebutuhan pemadatan.

Contoh: Bomag BW213D-5, Caterpillar CP56.

b. Alat dan Mesin Pengangkutan Material

Pengangkutan material adalah tahap penting untuk memastikan bahan konstruksi sampai ke lokasi kerja tepat waktu dan dalam kondisi baik.

- Dump Truck

Fungsi: Mengangkut material agregat, tanah, dan beton.

Keunggulan: Kapasitas besar, efisien.

Contoh: Volvo A40G, Komatsu HD465.

- Concrete Mixer Truck

Fungsi: Mengangkut dan menjaga homogenitas campuran beton hingga lokasi pengecoran.

Keunggulan: Menjamin kualitas beton selama perjalanan.

Contoh: Schwing Stetter, Liebherr HTM.

c. Alat dan Mesin Pemrosesan Material

Pengolahan material dilakukan untuk memastikan material memenuhi spesifikasi teknis.

- Asphalt Plant

Fungsi: Produksi campuran aspal panas untuk perkerasan lentur.

Keunggulan: Kapasitas besar, efisiensi tinggi.

Contoh: Ammann ASP Series, Marini Atomix.

- Concrete Batching Plant

Fungsi: Produksi beton dengan komposisi campuran tepat.

Keunggulan: Akurasi tinggi dalam pencampuran beton.

Contoh: Liebherr HBT Series, Schwing Stetter.

d. Alat dan Mesin Pemasangan Perkerasan

Tahap pemasangan perkerasan melibatkan peralatan khusus sesuai jenis perkerasan.

1) Perkerasan Lentur

- Asphalt Paver Machine

Fungsi: Menyebarluaskan campuran aspal panas secara merata.

Keunggulan: Kontrol ketebalan lapisan dan kualitas permukaan.

Contoh: Vogege Super 2100-3, Volvo ABG 5820.

- Compactor / Roller

Fungsi: Pemadatan lapisan aspal.

Jenis: Tandem roller, pneumatic roller, vibratory roller.

Contoh: Bomag BW213D, Caterpillar CB534.

2) Perkerasan Kaku

- Slipform Paver

Fungsi: Membentuk dan memadatkan slab beton kaku.

Keunggulan: Proses cepat, akurasi tinggi, mengurangi joint cutting.

Contoh: GOMACO GP4, CMI Model 150.

- Concrete Vibrator

Fungsi: Pemadatan beton untuk menghindari rongga udara.

Keunggulan: Memastikan beton mencapai kepadatan optimal.

Jenis: Internal vibrator, surface vibrator.

e. Alat Finishing dan Pengendalian Mutu

Finishing adalah tahap akhir untuk memastikan permukaan jalan memenuhi standar teknis.

- Trowel Machine

Fungsi: Menghaluskan permukaan beton.

Keunggulan: Efisiensi tinggi pada area luas.

Contoh: Wacker Neuson BFS Series.

- Profilometer

Fungsi: Mengukur kelurusinan permukaan jalan.

Keunggulan: Data akurat untuk evaluasi kualitas pekerjaan.

- Coring Machine

Fungsi: Pengambilan sampel inti beton untuk uji laboratorium.

Keunggulan: Memberikan data kualitas beton secara langsung.



## 2. Standar Penggunaan Alat dan Mesin Konstruksi

Penggunaan alat dan mesin konstruksi harus sesuai dengan standar dan spesifikasi teknis yang berlaku, termasuk:

- SNI (Standar Nasional Indonesia): Mengatur prosedur penggunaan alat berat, keselamatan kerja, dan kapasitas produksi.
- AASHTO Guidelines: Mengatur prosedur konstruksi dan penggunaan peralatan pada proyek jalan raya.
- PCA Guidelines: Standar penggunaan alat pada konstruksi perkerasan kaku.

Tabel 22. Standar Kapasitas dan Penggunaan Mesin Konstruksi

Jenis Mesin	Kapasitas Kerja	Standar Penggunaan
Bulldozer	100–500 HP	SNI 03-3221-2014
Motor Grader	120–250 HP	SNI 03-3222-2014
Asphalt Paver Machine	200–500 ton/jam	AASHTO M 140 / SNI
Concrete Batching Plant	30–150 m <sup>3</sup> /jam	PCA Guidelines
Roller Vibratory	8–20 ton	SNI 03-3223-2014

### **3. Teknologi Modern pada Mesin Konstruksi**

Perkembangan teknologi konstruksi perkerasan telah memperkenalkan inovasi alat dan mesin yang meningkatkan efisiensi, kualitas, dan keamanan konstruksi:

- a. *Intelligent Compaction (IC)*: Roller yang dilengkapi sensor untuk memastikan kepadatan lapisan sesuai standar teknis, mengurangi biaya pemadatan ulang.
- b. *Automated Paving Systems*: Mesin paving otomatis dengan kontrol ketebalan real-time.
- c. GPS dan Laser Guidance: Digunakan pada grading dan paving untuk akurasi elevasi dan kemiringan.
- d. *Self-consolidating Concrete (SCC)*: Mempermudah pengecoran slab beton kaku tanpa memerlukan vibrator manual secara ekstensif.

## **E. Manajemen Mutu Konstruksi**

Manajemen mutu konstruksi (*Construction Quality Management*) merupakan suatu pendekatan sistematis untuk memastikan bahwa seluruh tahapan konstruksi perkerasan jalan dilaksanakan sesuai standar teknis, spesifikasi desain, dan persyaratan kontrak. Tujuan utama manajemen mutu adalah memastikan perkerasan yang dihasilkan memiliki kualitas optimal, umur layanan yang panjang, biaya pemeliharaan rendah, serta keselamatan dan kenyamanan pengguna jalan terjamin (Abuhav, 2021). Manajemen mutu konstruksi tidak hanya terbatas pada pemeriksaan hasil akhir pekerjaan, tetapi mencakup seluruh proses konstruksi dari tahap persiapan, pelaksanaan, hingga serah terima. Ini melibatkan perencanaan mutu (*Quality Planning*), jaminan mutu (*Quality Assurance*), dan pengendalian mutu (*Quality Control*). Tahapan manajemen mutu untuk konstruksi perkerasan jalan sebagai berikut:

### **1. Perencanaan Mutu (*Quality Planning*)**

Perencanaan mutu adalah langkah awal dalam manajemen mutu konstruksi yang bertujuan menetapkan standar mutu dan metode pengendalian yang digunakan sepanjang proyek. Aktivitas utama meliputi:

- a. Penentuan standar mutu berdasarkan SNI, AASHTO, atau PCA Guidelines.
- b. Penyusunan rencana mutu proyek (*Quality Management Plan – QMP*).
- c. Penetapan prosedur pengujian material dan proses konstruksi.
- d. Penentuan indikator kinerja mutu (*Key Performance Indicators – KPI*).

Contoh: Dalam konstruksi perkerasan lentur, rencana mutu akan memuat persyaratan kadar aspal (%), CBR tanah dasar, gradasi agregat, kepadatan lapisan, dan ketebalan lapisan sesuai desain (MDPJ, 2017).

## 2. Jaminan Mutu (*Quality Assurance – QA*)

Jaminan mutu adalah sistem manajemen untuk memberikan keyakinan bahwa proses konstruksi akan memenuhi persyaratan mutu. QA dalam konstruksi perkerasan mencakup:

- a. Sertifikasi material dari pemasok.
- b. Pengawasan proses produksi campuran aspal/beton.
- c. Pelatihan operator alat dan mesin konstruksi.
- d. Audit internal mutu secara berkala.

Menurut Kementerian PUPR (2017), QA meliputi pengawasan kualitas di tahap:

- a. Persiapan lahan.
- b. Produksi dan pengujian material.
- c. Pelaksanaan pekerjaan lapisan perkerasan.

## 3. Pengendalian Mutu (*Quality Control – QC*)

Pengendalian mutu meliputi kegiatan pengujian dan pemeriksaan hasil pekerjaan untuk memastikan kesesuaian dengan spesifikasi teknis. QC dilakukan melalui:

- a. Pengujian material:
  - 1) *California Bearing Ratio* (CBR) untuk tanah dasar.
  - 2) *Marshall Stability Test* untuk aspal.
  - 3) *Compressive Strength Test* untuk beton.
- b. Pengujian lapangan:
  - 1) Uji kepadatan lapangan (*field density test*).
  - 2) Uji ketebalan lapisan (*core sampling* atau *non-destructive testing*).
  - 3) Pengujian kelurusinan permukaan (*profilometer test*).

Tabel 23. Contoh Aktivitas QC pada Perkerasan Jalan

Aktivitas QC	Frekuensi	Tujuan Pengujian
Uji CBR	1 kali per 1000 m <sup>2</sup>	Menentukan kekuatan tanah dasar
Marshall Stability Test	Setiap batch campuran	Menilai kualitas campuran aspal
Compressive Strength Test	Setiap batch beton	Menilai kekuatan beton
Field Density Test	Setiap lapisan	Menilai kepadatan lapisan
Profilometer	Setiap 500 m	Menilai kelurusinan permukaan





# **BAB VIII**

# **PEMELIHARAAN DAN**

# **REHABILITASI**

---

Pemeliharaan dan rehabilitasi perkerasan jalan merupakan kegiatan penting untuk mempertahankan kinerja, keselamatan, dan kenyamanan pengguna jalan. Jalan yang telah dibangun akan mengalami penurunan kualitas akibat beban lalu lintas, perubahan cuaca, serta faktor lingkungan lainnya. Tanpa pemeliharaan yang tepat, kerusakan kecil dapat berkembang menjadi masalah serius yang membutuhkan biaya perbaikan lebih besar. Oleh karena itu, pemeliharaan dan rehabilitasi menjadi bagian integral dari siklus hidup perkerasan jalan yang harus direncanakan secara sistematis.

Bab ini membahas jenis-jenis kerusakan perkerasan, strategi pemeliharaan rutin, berkala, serta rehabilitasi untuk mempertahankan atau mengembalikan fungsi jalan. Selain itu, bab ini membahas teknik overlay dan resurfacing sebagai metode rehabilitasi, serta teknologi rehabilitasi modern yang menggunakan material dan metode terbaru. Pendekatan ini bertujuan untuk memperpanjang umur layanan jalan secara ekonomis. Bab ini juga membahas sistem manajemen perkerasan (Pavement Management System), yang menjadi alat penting untuk pengambilan keputusan pemeliharaan dan rehabilitasi berdasarkan data kondisi jalan.

## **A. Jenis-jenis Kerusakan Perkerasan**

Kerusakan perkerasan merupakan salah satu tantangan utama dalam pengelolaan jalan raya. Kerusakan ini mempengaruhi kenyamanan dan keselamatan pengguna jalan, serta meningkatkan biaya pemeliharaan dan rehabilitasi. Oleh karena itu, pemahaman tentang jenis-jenis kerusakan perkerasan menjadi hal krusial bagi perencanaan dan

pengelola jalan (Benmhahe & Chentoufi, 2021). Kerusakan perkerasan dapat terjadi pada jenis perkerasan lentur (*flexible pavement*) maupun kaku (*rigid pavement*), dengan penyebab yang berasal dari beban lalu lintas, kondisi lingkungan, kualitas material, maupun kesalahan konstruksi.

## 1. Jenis Kerusakan pada Perkerasan Lentur

### a. Retak Permukaan (*Cracking*)

Retak adalah kerusakan paling umum pada perkerasan lentur. Jenis retak tergantung pada penyebabnya.

#### 1) *Alligator Cracking / Fatigue Cracking*

Pola retak seperti jaring ikan yang menunjukkan kerusakan struktural pada lapisan aspal akibat beban lalu lintas berulang (*fatigue load*).

Penyebab: kurangnya ketebalan lapisan, kualitas campuran aspal rendah, pemandatan tidak memadai.

Dampak: berkurangnya daya dukung perkerasan dan masuknya air ke lapisan bawah, mempercepat kerusakan.

#### 2) *Block Cracking*

Retak berbentuk kotak besar pada permukaan aspal.

Penyebab: perubahan suhu dan kelembaban yang menyebabkan ekspansi dan kontraksi.

Dampak: mengganggu kenyamanan berkendara dan mempermudah penetrasi air.

#### 3) *Transverse Cracking*

Retak melintang yang biasanya terbentuk tegak lurus terhadap arah lalu lintas.

Penyebab: pergerakan termal aspal atau lapisan bawah yang tidak stabil.

#### 4) *Longitudinal Cracking*

Retak sejajar arah lalu lintas.

Penyebab: masalah konstruksi seperti sambungan lapisan yang buruk atau pemandatan yang tidak merata.

### b. Deformasi Permanen

Deformasi permanen adalah penurunan atau perubahan bentuk perkerasan akibat beban berulang.

1) Rutting

Alur memanjang pada jalur lalu lintas yang terbentuk akibat deformasi lapisan permukaan.

Penyebab: pemanjangan yang tidak cukup, beban lalu lintas berulang, kualitas campuran yang buruk.

Dampak: berkurangnya keselamatan dan kenyamanan berkendara.

2) Shoving

Pergerakan horizontal pada lapisan permukaan akibat tekanan dinamis.

Penyebab: kualitas material rendah, konstruksi yang buruk.

3) Depression

Penurunan lokal pada permukaan jalan.

Penyebab: pemanjangan yang tidak merata, kehilangan material di bawah permukaan.

c. Kehilangan Material Permukaan

Kerusakan ini mengacu pada hilangnya material permukaan lapisan perkerasan.

1) Raveling

Lepasnya butiran agregat pada permukaan aspal.

Penyebab: oksidasi aspal, kualitas campuran rendah, pengikisan air dan udara.

Dampak: menurunkan kekasaran permukaan dan daya dukung.

2) Polished Aggregate

Permukaan agregat menjadi licin akibat lalu lintas dan pengikisan.

Dampak: menurunnya koefisien gesekan (skid resistance), meningkatkan risiko kecelakaan.

## 2. Jenis Kerusakan pada Perkerasan Kaku

a. Retak Beton

Retak pada beton sering terjadi pada slab perkerasan kaku.

1) Transverse Cracking

Retak melintang akibat kontraksi termal dan kekakuan beton.

Penyebab: suhu beton, pengaruh kelembaban, variasi elevasi slab.

Dampak: mempengaruhi kekuatan struktural slab.

2) Longitudinal Cracking

Retak sejajar arah lalu lintas, sering terjadi di dekat sambungan slab.

Penyebab: pergerakan termal, beban lalu lintas berulang.

3) Corner Cracking

Retak pada sudut slab beton, biasanya akibat dukungan yang tidak memadai.

Dampak: mengurangi stabilitas slab dan mempercepat kerusakan.

b. Deformasi Permukaan

1) Faulting

Perbedaan elevasi antar slab beton di sambungan slab.

Penyebab: keausan dowel joint, pergerakan tanah dasar, beban lalu lintas.

Dampak: getaran berlebih pada kendaraan, mengurangi kenyamanan berkendara.

c. Kehilangan Material

1) Spalling

Kehilangan fragmen beton pada tepi slab atau sambungan.

Penyebab: kontraksi termal, ekspansi beton akibat reaksi kimia, atau beban lalu lintas.

Dampak: menurunkan daya dukung slab dan mempercepat kerusakan.

### 3. Kerusakan pada Perkerasan Komposit

Perkerasan komposit menggabungkan perkerasan lentur dan kaku, sehingga kerusakan yang terjadi merupakan kombinasi dari kedua jenis perkerasan. Contoh:

- a. Cracking di lapisan lentur dan beton akibat kombinasi fatigue dan kontraksi termal.
- b. Delaminasi pada sambungan lapisan lentur dan slab beton akibat kegagalan adhesi.

#### **4. Faktor Penyebab Kerusakan Perkerasan**

- a. Beban lalu lintas: Volume, distribusi beban, dan beban poros mempengaruhi laju kerusakan.
- b. Kondisi lingkungan: Perubahan suhu, kelembaban, curah hujan, siklus pembekuan dan pencairan.
- c. Material konstruksi: Kualitas agregat, kualitas aspal/beton, penggunaan material daur ulang.
- d. Kualitas konstruksi: Kesalahan dalam pemasangan, ketebalan lapisan, sambungan slab, curing beton.
- e. Usia perkerasan: Kerusakan cenderung meningkat seiring bertambahnya usia jalan.

#### **5. Pengaruh Kerusakan terhadap Fungsi Jalan**

Kerusakan perkerasan menyebabkan:

- a. Penurunan kenyamanan berkendara.
- b. Peningkatan risiko kecelakaan (*traffic safety hazards*).
- c. Biaya pemeliharaan dan rehabilitasi yang lebih tinggi.
- d. Penurunan umur layanan jalan.

Kerusakan yang tidak ditangani tepat waktu dapat berkembang menjadi kerusakan struktural yang membutuhkan rehabilitasi penuh, sehingga biaya perbaikan jauh lebih tinggi dibandingkan pemeliharaan rutin.

#### **6. Standar Penilaian Kerusakan Perkerasan**

Menurut Manual Perkerasan Jalan – Kementerian PUPR (2017) dan AASHTO *Pavement Condition Index* (PCI), penilaian kerusakan dilakukan dengan metode inspeksi visual dan pengukuran lapangan, seperti:

- a. *Visual Condition Survey*: Identifikasi jenis dan tingkat kerusakan.
- b. *FWD Test (Falling Weight Deflectometer)*: Menilai kekakuan lapisan perkerasan.
- c. Profilometer: Mengukur kelurusinan permukaan jalan.
- d. *Skid Resistance Test*: Mengukur daya cengkeram permukaan jalan.

Tabel 24. Indeks Kerusakan Perkerasan Menurut PCI

Nilai PCI	Kondisi Jalan
85–100	Sangat Baik
70–85	Baik
55–70	Sedang
40–55	Buruk
<40	Sangat Buruk

## B. Strategi Pemeliharaan (Rutin, Berkala, Rehabilitasi)

Pemeliharaan perkerasan jalan adalah rangkaian tindakan yang dilakukan untuk menjaga kondisi jalan tetap memenuhi fungsi desainnya sepanjang umur layanannya. Strategi pemeliharaan ini harus dilakukan secara terencana untuk mempertahankan kualitas jalan, memperpanjang umur perkerasan, dan meminimalkan biaya perbaikan besar di masa depan. Strategi ini dipilih berdasarkan kondisi perkerasan, tingkat kerusakan, volume lalu lintas, dan prioritas anggaran pemeliharaan jalan.

### 1. Pemeliharaan Rutin (*Routine Maintenance*)

Pemeliharaan rutin adalah kegiatan perawatan yang dilakukan secara kontinu untuk mempertahankan kondisi jalan dalam keadaan baik. Tujuannya adalah menghindari kerusakan yang lebih parah sehingga umur layanan perkerasan lebih panjang. Karakteristik pemeliharaan rutin:

- a. Dilaksanakan secara berkesinambungan.
- b. Memiliki biaya relatif kecil dibandingkan rehabilitasi.
- c. Fokus pada pencegahan kerusakan.
- d. Dilaksanakan dengan interval waktu singkat (mingguan/bulanan).

Menurut Manual Perkerasan Jalan – Kementerian PUPR (2017), aktivitas pemeliharaan rutin meliputi:

- 1) Pembersihan Jalan: Menghilangkan material longgar, sampah, dan daun kering yang dapat mengganggu drainase dan mengakibatkan kerusakan.
- 2) Perbaikan Minor: Mengisi lubang kecil (*patching*), memperbaiki retak kecil (*crack sealing*), dan memperbaiki kerusakan ringan lainnya.
- 3) Pengendalian Vegetasi: Pemotongan rumput, pembersihan saluran drainase untuk mencegah kerusakan akibat akumulasi air.

- 4) Pengawasan Kondisi Jalan: Monitoring rutin terhadap kondisi permukaan jalan untuk mendeteksi tanda-tanda awal kerusakan.

Tabel 25. Aktivitas Pemeliharaan Rutin pada Jalan Raya

Aktivitas	Frekuensi	Tujuan
Pembersihan permukaan jalan	Mingguan/Bulanan	Mencegah penumpukan material penganggu
Perbaikan lubang kecil	Sesuai kebutuhan	Mencegah meluasnya kerusakan
Crack sealing	Setiap 1–2 tahun	Mencegah masuknya air ke lapisan bawah
Pemotongan vegetasi	Setiap 3–6 bulan	Menjaga drainase jalan

## 2. Pemeliharaan Berkala (*Periodic Maintenance*)

Pemeliharaan berkala dilakukan pada interval tertentu, dengan intensitas pekerjaan yang lebih besar dibandingkan pemeliharaan rutin. Strategi ini bertujuan mengatasi kerusakan yang sudah berkembang dan memperpanjang umur perkerasan jalan. Karakteristik pemeliharaan berkala:

- a. Dilakukan pada periode tertentu (setiap 3–5 tahun tergantung kondisi jalan).
- b. Memiliki biaya lebih tinggi dibandingkan pemeliharaan rutin.
- c. Fokus pada perbaikan kerusakan yang sudah berkembang dan mencegah kerusakan lebih lanjut.

Berdasarkan Kementerian PUPR (2017) dan AASHTO Pavement Preservation Guide (2018), kegiatan pemeliharaan berkala meliputi:

- 1) Overlay / Penambahan Lapisan Baru: Penambahan lapisan permukaan baru pada perkerasan lentur atau kaku untuk meningkatkan ketebalan dan memperbaiki kondisi permukaan.
- 2) Reprofiling Permukaan: Mengoreksi deformasi permukaan jalan seperti rutting dan depression.
- 3) Re-sealing / Crack Filling Intensif: Menggunakan material sealant berkualitas tinggi untuk menutup retak yang telah berkembang.
- 4) Perbaikan Drainase: Pembersihan saluran drainase dan perbaikan sistem drainase jalan.

- 5) Pelapisan Tipis (*Thin Overlay*): Penambahan lapisan tipis aspal modifikasi untuk memperbaiki permukaan dan memperpanjang umur perkerasan.

Tabel 26. Aktivitas Pemeliharaan Berkala pada Perkerasan

Aktivitas	Interval Waktu	Tujuan
Overlay	3–5 tahun	Memperbaiki kondisi permukaan & ketebalan
Reprofiling	Sesuai kondisi	Memperbaiki deformasi permukaan
Re-sealing / crack filling	2–3 tahun	Mencegah penetrasi air ke lapisan bawah
Perbaikan drainase	3–5 tahun	Mencegah kerusakan akibat kelembaban
Thin overlay	3–5 tahun	Memperbaiki tekstur & kekasaran permukaan

### 3. Rehabilitasi Perkerasan (*Pavement Rehabilitation*)

Rehabilitasi adalah perbaikan besar yang dilakukan untuk mengembalikan kondisi jalan mendekati kondisi awal atau memperpanjang umur layanan signifikan. Rehabilitasi dilakukan ketika pemeliharaan rutin atau berkala tidak lagi efektif. Karakteristik rehabilitasi:

- a. Dilakukan pada kondisi jalan yang telah mengalami kerusakan signifikan.
- b. Biaya lebih tinggi dibandingkan pemeliharaan rutin dan berkala.
- c. Memerlukan analisis struktural dan evaluasi kondisi perkerasan yang mendalam.

Menurut AASHTO *Pavement Rehabilitation Guidelines* (2018), rehabilitasi dibedakan menjadi:

- a. Perbaikan Struktural (*Structural Rehabilitation*)  
Dilakukan untuk mengembalikan kapasitas struktural jalan, contohnya:
  - 1) *Mill and Overlay* (pengupasan dan penambahan lapisan baru).
  - 2) *Reconstruction* (pembongkaran seluruh lapisan perkerasan dan konstruksi ulang).

b. Perbaikan Permukaan (*Surface Rehabilitation*)

Fokus pada perbaikan permukaan, contohnya:

- 1) Microsurfacing.
- 2) Slurry seal.
- 3) Cape seal.

c. Rehabilitasi Fungsional

Mengatasi masalah kenyamanan dan keselamatan, misalnya memperbaiki kelurusan permukaan, skid resistance, dan drainase.

Rehabilitasi dilakukan melalui beberapa tahapan:

- 1) Inspeksi dan Evaluasi Kondisi Jalan: Menggunakan metode seperti PCI (*Pavement Condition Index*) dan FWD (*Falling Weight Deflectometer*) untuk menilai kondisi struktural jalan.
- 2) Analisis Alternatif Rehabilitasi: Memilih metode rehabilitasi yang sesuai berdasarkan kondisi perkerasan, biaya, dan masa manfaat.
- 3) Perencanaan dan Pelaksanaan Rehabilitasi: Mengacu pada pedoman desain seperti MDPJ dan AASHTO Guide for Design of Pavement Structures.

#### 4. Pendekatan Strategi Pemeliharaan Berbasis Kondisi Jalan

Strategi pemeliharaan harus berbasis kondisi jalan (*condition-based maintenance*) dan mempertimbangkan:

- a. Umur perkerasan.
- b. Tingkat kerusakan.
- c. Volume lalu lintas.
- d. Faktor lingkungan.
- e. Anggaran pemeliharaan.

Strategi Pemeliharaan Berbasis Kondisi Jalan:

- a. Kondisi Jalan Baik → Pemeliharaan Rutin
- b. Kondisi Jalan Sedang → Pemeliharaan Berkala
- c. Kondisi Jalan Buruk → Rehabilitasi

#### 5. Evaluasi Efektivitas Strategi Pemeliharaan

Evaluasi dilakukan untuk memastikan strategi yang diterapkan efektif. Indikator evaluasi meliputi:

- a. Perpanjangan umur layanan perkerasan.
- b. Pengurangan biaya total pemeliharaan.

- c. Peningkatan keselamatan dan kenyamanan berkendara.
- d. Efisiensi penggunaan anggaran pemeliharaan.

### C. Teknik Overlay dan Resurfacing

Overlay dan resurfacing adalah metode rehabilitasi perkerasan yang paling umum digunakan dalam pemeliharaan jalan. Kedua teknik ini bertujuan memperpanjang umur layanan jalan, memperbaiki kenyamanan berkendara, serta meningkatkan kapasitas struktural perkerasan tanpa membongkar lapisan perkerasan secara keseluruhan (Tajudin, 2021). Teknik ini merupakan alternatif yang lebih ekonomis dibandingkan rekonstruksi penuh dan memiliki waktu pelaksanaan yang lebih singkat.

Overlay adalah proses menambah lapisan baru pada permukaan perkerasan eksisting untuk memperbaiki kondisi struktural dan permukaan. Overlay biasanya lebih tebal dan memperbaiki kapasitas struktural perkerasan (*structural improvement*). Sedangkan resurfacing adalah proses memperbaiki permukaan jalan dengan lapisan tipis, fokus pada peningkatan kenyamanan dan keselamatan, tanpa memperbaiki kapasitas struktural secara signifikan (AASHTO, 2018).

Tabel 27. Perbedaan Overlay dan Resurfacing

Aspek	Overlay	Resurfacing
Tujuan	Memperbaiki struktur & permukaan	Memperbaiki permukaan
Ketebalan lapisan	>50 mm hingga >100 mm	10–50 mm
Dampak struktural	Signifikan	Terbatas
Waktu pelaksanaan	Lebih lama	Lebih cepat
Biaya	Lebih tinggi	Lebih rendah

#### 1. Jenis Overlay

Overlay dapat dilakukan pada perkerasan lentur maupun kaku, dengan pendekatan yang berbeda sesuai kondisi perkerasan dan tujuan rehabilitasi.

a. Overlay pada Perkerasan Lentur

Overlay pada perkerasan lentur biasanya menggunakan lapisan aspal baru (*asphalt overlay*), yang dapat berupa:

- 1) *Dense-graded Asphalt Overlay*: campuran aspal dengan kepadatan tinggi untuk meningkatkan kekuatan struktural.
- 2) *Stone Matrix Asphalt* (SMA): campuran aspal dengan agregat berstruktur khusus untuk meningkatkan ketahanan terhadap deformasi (*rutting*).
- 3) *Open-graded Asphalt Overlay*: campuran dengan porositas tinggi untuk meningkatkan drainase permukaan dan mengurangi kebisingan jalan.

b. Overlay pada Perkerasan Kaku

Overlay pada perkerasan kaku dapat berupa:

- 1) *Concrete Overlay*: lapisan beton baru yang ditempatkan di atas slab beton eksisting.
- 2) *Asphalt Overlay* pada *Rigid Pavement*: lapisan aspal pada perkerasan beton, digunakan ketika perbaikan cepat dan biaya rendah diperlukan.

Overlay beton dapat berupa:

- 1) *Bonded Concrete Overlay*: lapisan beton baru yang terikat secara struktural dengan slab beton lama.
- 2) *Unbonded Concrete Overlay*: lapisan beton baru yang terpisah dari slab lama dengan lapisan interlayer.
- 3) *Whitetopping*: overlay beton pada perkerasan aspal untuk meningkatkan kekuatan struktural.

## 2. Teknik Resurfacing

Resurfacing dilakukan untuk memperbaiki kondisi permukaan jalan tanpa membongkar lapisan perkerasan yang ada. Teknik ini memiliki biaya yang relatif lebih rendah dibandingkan overlay penuh.

a. Resurfacing pada Perkerasan Lentur

Beberapa metode resurfacing pada perkerasan lentur antara lain:

- 1) *Microsurfacing*: pelapisan tipis menggunakan campuran slurry seal yang mengandung agregat halus dan emulsi aspal.
- 2) *Slurry Seal*: lapisan tipis slurry aspal yang digunakan untuk menutup retak kecil dan meningkatkan tekstur permukaan.
- 3) *Thin Asphalt Overlay*: lapisan aspal tipis dengan ketebalan 10–50 mm untuk memperbaiki kondisi permukaan.

b. Resurfacing pada Perkerasan Kaku

Resurfacing pada perkerasan kaku dapat meliputi:

- 1) Diamond Grinding: penghalusan permukaan beton slab menggunakan alat grinding untuk meningkatkan kelurusinan dan skid resistance.
- 2) Thin Bonded Overlay: lapisan tipis beton atau aspal untuk memperbaiki permukaan slab beton.

### 3. Pertimbangan Pemilihan Teknik Overlay dan Resurfacing

Pemilihan metode overlay atau resurfacing didasarkan pada beberapa faktor utama:

- a. Kondisi Perkerasan Eksisting: Overlay dipilih jika perkerasan mengalami kerusakan struktural yang signifikan. Resurfacing dipilih jika kerusakan terbatas pada permukaan.
- b. Volume dan Beban Lalu Lintas: Jalan dengan volume lalu lintas tinggi memerlukan teknik overlay struktural yang lebih tebal.
- c. Umur Perkerasan dan Anggaran: Overlay beton memiliki biaya lebih tinggi tetapi umur layanan lebih panjang dibandingkan resurfacing.
- d. Ketersediaan Material: Pemilihan jenis overlay bergantung pada ketersediaan agregat dan bahan aspal atau beton.
- e. Kondisi Lingkungan: Perkerasan di daerah dengan kondisi iklim ekstrem memerlukan desain overlay yang lebih tahan terhadap ekspansi termal dan kelembaban.

### 4. Proses Pelaksanaan Overlay dan Resurfacing

a. Tahapan Overlay

Menurut AASHTO *Pavement Rehabilitation Guide* (2018) dan Kementerian PUPR (2017), tahapan overlay meliputi:

- 1) Persiapan Permukaan: Pembersihan permukaan jalan dari debris, loose material, dan lapisan lama yang rusak.
- 2) Perbaikan Kerusakan Eksisting: Patching lubang dan retak.
- 3) Penerapan Interlayer (jika diperlukan): Penggunaan tack coat atau bonding layer untuk memastikan ikatan lapisan baru dengan lapisan lama.
- 4) Penempatan Overlay: Penempatan lapisan baru menggunakan alat paving dan compaction yang sesuai.

- 5) *Quality Control*: Pengukuran ketebalan lapisan, kepadatan, dan tekstur permukaan.
- b. Tahapan Resurfacing  
Proses resurfacing relatif lebih sederhana:
  - 1) Pembersihan dan Inspeksi Permukaan
  - 2) Penutupan Retak dan Perbaikan Minor
  - 3) Pelapisan Resurfacing: Penerapan slurry seal, microsurfacing, atau thin overlay sesuai metode yang dipilih.
  - 4) Pengujian Kualitas Permukaan

## 5. Keunggulan dan Keterbatasan Overlay dan Resurfacing

- a. Keunggulan
  - 1) Memperpanjang umur layanan jalan.
  - 2) Mengurangi biaya rehabilitasi penuh.
  - 3) Meningkatkan kenyamanan dan keselamatan berkendara.
  - 4) Pelaksanaan relatif cepat dibandingkan rekonstruksi penuh.
- b. Keterbatasan
  - 1) Overlay yang terlalu tipis dapat menyebabkan retak kembali (*reflective cracking*).
  - 2) Resurfacing tidak memperbaiki masalah struktural pada lapisan bawah.
  - 3) Overlay beton memerlukan waktu curing yang cukup lama.
  - 4) Biaya overlay beton lebih tinggi dibandingkan overlay aspal atau resurfacing.

## D. Teknologi Rehabilitasi Modern

Teknologi rehabilitasi modern adalah inovasi dalam metode perbaikan dan peningkatan kondisi perkerasan jalan yang memanfaatkan teknik, material, dan sistem terbaru untuk meningkatkan efisiensi, efektivitas, dan keberlanjutan. Seiring dengan perkembangan teknologi material, sensor, dan sistem manajemen, metode rehabilitasi jalan telah berkembang dari pendekatan konvensional menjadi lebih canggih dan ramah lingkungan. Teknologi modern ini juga sangat relevan dalam menghadapi tantangan peningkatan volume lalu lintas, perubahan iklim, dan keterbatasan anggaran pemeliharaan jalan.

## 1. Tren Teknologi Rehabilitasi Jalan Modern

Menurut AASHTO Pavement Rehabilitation Guide (2018), teknologi rehabilitasi modern mencakup beberapa tren utama:

a. *Cold In-place Recycling* (CIR)

CIR adalah metode daur ulang perkerasan yang memungkinkan lapisan lama diperbaiki di tempat tanpa pengangkutan material secara besar-besaran.

- 1) Prinsip kerja: Lapisan perkerasan lama dihaluskan dan dicampur kembali dengan emulsi aspal atau bahan pengikat lain, kemudian ditempatkan kembali sebagai lapisan baru.
- 2) Keunggulan:
  - a) Menghemat biaya pengangkutan dan material baru.
  - b) Mengurangi emisi CO<sub>2</sub>.
  - c) Memperbaiki kondisi struktur perkerasan.
- 3) Aplikasi: Digunakan pada jalan dengan kerusakan permukaan sedang hingga berat dan volume lalu lintas rendah hingga sedang.

b. *Hot In-place Recycling* (HIR)

HIR adalah proses rehabilitasi perkerasan yang memanfaatkan pemanasan lapisan aspal eksisting untuk mengaktifkan kembali sifat material, kemudian dicampur dengan material tambahan sebelum ditempatkan kembali.

- 1) Keunggulan
  - a) Waktu penggeraan cepat.
  - b) Mengurangi kebutuhan material baru.
  - c) Memperbaiki kondisi permukaan dan struktur jalan.

Aplikasi: Cocok untuk rehabilitasi jalan dengan kerusakan permukaan ringan hingga sedang di area urban dengan kebutuhan lalu lintas tinggi.

c. *Full Depth Reclamation* (FDR)

FDR adalah teknologi rehabilitasi jalan yang mencakup pengolahan seluruh lapisan perkerasan hingga lapisan subgrade untuk membentuk lapisan struktural baru.

- 1) Proses: Material lama digiling, dicampur dengan bahan pengikat seperti semen, kapur, atau emulsi aspal, dan ditempatkan kembali sebagai lapisan baru.
- 2) Keunggulan:
  - a) Memperbaiki masalah struktural yang mendalam.

- b) Mengurangi kebutuhan material baru secara signifikan.
  - c) Ramah lingkungan karena memanfaatkan material lama.
- 3) Aplikasi: Umumnya digunakan untuk jalan-jalan yang mengalami kerusakan berat pada lapisan bawah dan atas.

## 2. Material Inovatif dalam Rehabilitasi Modern

Material baru berperan besar dalam teknologi rehabilitasi modern. Beberapa material yang digunakan antara lain:

- a. *Hot Mix Asphalt (HMA)* dengan Modifikasi Polimer

*Hot Mix Asphalt (HMA)* dengan modifikasi polimer merupakan inovasi penting dalam rehabilitasi perkerasan modern. Penambahan polimer pada campuran HMA meningkatkan sifat viskoelastis aspal, sehingga memperkuat elastisitas lapisan perkerasan. Peningkatan elastisitas ini membuat perkerasan lebih mampu menahan deformasi permanen akibat beban lalu lintas berulang, terutama pada suhu tinggi. Selain itu, modifikasi polimer membantu meningkatkan ketahanan terhadap retak pada suhu rendah, sehingga memperpanjang umur layanan jalan (Huang, 2017).

Penggunaan HMA termodifikasi polimer juga memberikan manfaat ekonomi dan lingkungan. Meskipun biaya awal produksi lebih tinggi, peningkatan umur layanan perkerasan mengurangi frekuensi rehabilitasi dan perawatan, yang pada akhirnya menurunkan biaya jangka panjang. Dampak lingkungan juga berkurang karena penggunaan material modifikasi mengurangi kebutuhan perbaikan yang menghasilkan emisi dan limbah konstruksi.

- b. *Reclaimed Asphalt Pavement (RAP)*

*Reclaimed Asphalt Pavement (RAP)* adalah material daur ulang yang diperoleh dari lapisan aspal lama hasil penggalian atau pengupasan permukaan jalan. Material ini kemudian dihancurkan dan dicampur kembali dengan aspal baru untuk digunakan dalam konstruksi atau rehabilitasi perkerasan. Penggunaan RAP menawarkan keuntungan signifikan, baik dari segi ekonomi maupun lingkungan.

RAP juga berkontribusi pada keberlanjutan infrastruktur. Dengan mengurangi kebutuhan aspal baru, penggunaan RAP membantu menekan konsumsi energi dan emisi karbon yang dihasilkan dari

proses produksi aspal. RAP juga mengurangi limbah konstruksi yang harus dibuang ke tempat pembuangan akhir, sehingga mendukung prinsip ekonomi sirkular.

c. Geosintetik

Geosintetik, seperti geotextile dan geomembrane, merupakan material inovatif yang digunakan dalam rehabilitasi perkerasan modern untuk meningkatkan kinerja struktur jalan. Geotextile berfungsi sebagai lapisan pemisah dan filtrasi antara lapisan perkerasan dan tanah dasar, sehingga mencegah pencampuran material dan menjaga stabilitas struktur. Sementara itu, geomembrane berperan sebagai penghalang terhadap penetrasi air, sehingga melindungi lapisan bawah dari kelembaban berlebih yang dapat menurunkan kapasitas dukung tanah (Koerner, 2012).

Geosintetik juga membantu mengurangi deformasi permanen seperti rutting. Material ini juga meningkatkan efisiensi sistem drainase pada struktur jalan dengan mengarahkan aliran air secara terkontrol, sehingga memperpanjang umur layanan perkerasan. Implementasi geosintetik dalam desain dan rehabilitasi jalan modern menjadi solusi teknis yang efektif, ekonomis, serta ramah lingkungan dalam menghadapi tantangan kinerja perkerasan di berbagai kondisi lalu lintas dan iklim.

d. *High-Performance Concrete (HPC)*

*High-Performance Concrete (HPC)* merupakan material inovatif yang banyak digunakan dalam rehabilitasi perkerasan kaku karena kemampuan mekaniknya yang unggul. HPC memiliki kekuatan tekan yang tinggi, modulus elastisitas besar, serta durabilitas yang superior dibanding beton konvensional. Karakteristik ini membuat HPC mampu menahan beban lalu lintas berat dan kondisi iklim ekstrem, sehingga memperpanjang umur layanan slab beton.

Penggunaan HPC dalam rehabilitasi perkerasan kaku juga mampu mengurangi frekuensi perbaikan dan biaya pemeliharaan jangka panjang. Beton ini memiliki ketahanan tinggi terhadap retak dan kerusakan akibat siklus beban maupun perubahan suhu, sehingga menjaga integritas struktur jalan. Implementasi HPC memerlukan perencanaan dan kontrol mutu yang ketat, termasuk pemilihan bahan baku, campuran beton, dan proses pengecoran.

Hal ini menjadikan HPC sebagai solusi efektif untuk meningkatkan kinerja dan efisiensi rehabilitasi perkerasan modern.

### 3. Teknologi Pemantauan dan Evaluasi Kondisi Jalan

Teknologi rehabilitasi modern juga memanfaatkan sistem pemantauan kondisi jalan yang canggih untuk perencanaan rehabilitasi berbasis kondisi (*condition-based rehabilitation*).

#### a. *Pavement Management System* (PMS)

*Pavement Management System* (PMS) adalah sistem yang mengintegrasikan data kondisi jalan, lalu lintas, dan faktor lingkungan untuk mendukung perencanaan pemeliharaan dan rehabilitasi secara efisien. PMS menggunakan data historis, inspeksi lapangan, dan teknologi digital untuk menghasilkan informasi yang akurat mengenai kondisi perkerasan. Dengan sistem ini, perencanaan perbaikan dapat dilakukan secara proaktif, sehingga biaya pemeliharaan dapat ditekan dan umur layanan jalan dapat diperpanjang.

PMS memungkinkan pengambilan keputusan berbasis data yang objektif. Sistem ini menyediakan analisis prediktif mengenai degradasi jalan, prioritas perbaikan, dan estimasi biaya yang diperlukan. Integrasi PMS dengan teknologi seperti *Geographic Information System* (GIS) dan sensor kondisi jalan meningkatkan efektivitas pemantauan. Dengan demikian, PMS menjadi alat strategis dalam manajemen jaringan jalan, memastikan perkerasan tetap aman, nyaman, dan efisien secara ekonomi.

#### b. Sensor dan Monitoring Berbasis IoT

Sensor berbasis *Internet of Things* (IoT) pada jalan memberikan kemampuan monitoring kondisi perkerasan secara real-time. Sensor ini dapat mengukur deformasi, retakan, suhu, dan kelembaban lapisan perkerasan, sehingga memungkinkan pemantauan kinerja jalan secara kontinu tanpa perlu inspeksi manual yang mahal dan memakan waktu. Data yang diperoleh dapat membantu mendeteksi kerusakan pada tahap awal, sehingga intervensi perbaikan dapat dilakukan lebih cepat dan tepat.

Integrasi sensor IoT dengan sistem pemantauan digital memungkinkan analisis data secara otomatis dan prediktif. Informasi kondisi jalan ini dapat diakses secara real-time oleh

pengelola jalan melalui platform digital, sehingga memudahkan perencanaan pemeliharaan dan rehabilitasi. Teknologi ini tidak hanya meningkatkan efisiensi operasional, tetapi juga memperpanjang umur layanan perkerasan serta mengurangi biaya perbaikan jangka panjang. IoT menjadi inovasi strategis dalam manajemen jalan modern.

c. UAV dan Teknologi Penginderaan Jauh

Penggunaan *Unmanned Aerial Vehicle* (UAV) atau drone dalam inspeksi kondisi jalan telah menjadi terobosan penting dalam manajemen perkerasan modern. Dengan dilengkapi teknologi penginderaan jauh seperti LiDAR, UAV mampu melakukan pemetaan dan analisis permukaan jalan secara cepat dan akurat tanpa mengganggu lalu lintas (Zhou et al., 2025). Data yang diperoleh berupa citra resolusi tinggi dan model 3D kondisi perkerasan yang memudahkan identifikasi retak, deformasi, serta masalah drainase.

Teknologi UAV juga meningkatkan keselamatan kerja karena inspeksi dilakukan tanpa perlu personel berada langsung di lokasi berisiko tinggi. Integrasi LiDAR memungkinkan deteksi kerusakan yang sulit dilihat mata telanjang, serta menghasilkan data kuantitatif untuk evaluasi kondisi jalan. Hal ini mendukung perencanaan pemeliharaan yang lebih tepat sasaran, meningkatkan umur layanan perkerasan, dan mengoptimalkan anggaran pengelolaan jalan.

## E. Sistem Manajemen Perkerasan (PMS)

Sistem Manajemen Perkerasan (*Pavement Management System*, PMS) adalah suatu kerangka kerja terintegrasi yang digunakan untuk merencanakan, mengelola, dan mengevaluasi kondisi jaringan jalan secara efektif dan efisien. PMS memanfaatkan data kondisi jalan, lalu lintas, lingkungan, serta biaya pemeliharaan untuk menentukan strategi rehabilitasi yang optimal (Yunianta & Setiadji, 2022). PMS merupakan elemen kunci dalam menjaga kualitas jaringan jalan nasional, terutama di era modern yang ditandai dengan peningkatan volume lalu lintas, tuntutan efisiensi anggaran, dan kebutuhan keberlanjutan infrastruktur. PMS membantu pemerintah dan badan pengelola jalan membuat

keputusan berbasis data (*data-driven decision-making*) untuk memprioritaskan pemeliharaan dan rehabilitasi jalan.

## 1. Fungsi dan Tujuan PMS

### a. Fungsi PMS

- 1) Memantau kondisi jaringan jalan secara sistematis.
- 2) Mengidentifikasi kebutuhan pemeliharaan dan rehabilitasi.
- 3) Mengoptimalkan alokasi anggaran pemeliharaan.
- 4) Memprioritaskan proyek berdasarkan urgensi dan dampak.
- 5) Memberikan data dasar untuk evaluasi kinerja jalan.

### b. Tujuan PMS

- 1) Memperpanjang umur layanan jaringan jalan dengan biaya optimal.
- 2) Mengurangi biaya total pemeliharaan sepanjang umur jalan.
- 3) Meningkatkan keselamatan, kenyamanan, dan keandalan jalan.
- 4) Mendukung pengambilan keputusan berbasis data dan bukti (*evidence-based decision making*).

## 2. Komponen Teknis dalam PMS

### a. Inventarisasi Jaringan Jalan

PMS membutuhkan database lengkap mengenai jaringan jalan, termasuk:

- 1) Panjang dan lebar jalan.
- 2) Tipe perkerasan (lentur, kaku, komposit).
- 3) Tahun konstruksi terakhir.
- 4) Beban lalu lintas (volume, jenis kendaraan, ESAL).

### b. Pengukuran Kondisi Jalan

Pengukuran kondisi jalan dilakukan secara periodik untuk memperoleh data aktual. Metode yang umum digunakan meliputi:

- 1) *Visual Inspection*: pemeriksaan manual kondisi permukaan.
- 2) *Automated Road Condition Surveys*: menggunakan sensor, kamera, dan LIDAR untuk memperoleh data degradasi.
- 3) *Roughness Measurement*: menggunakan IRI (*International Roughness Index*).

- 4) *Structural Capacity Measurement*: menggunakan metode FWD (*Falling Weight Deflectometer*) untuk mengukur kekakuan perkerasan.
- c. Model Prediksi Kondisi  
Model prediksi digunakan untuk memperkirakan degradasi jalan di masa depan berdasarkan:
  - 1) Data historis kondisi jalan.
  - 2) Volume lalu lintas dan ESAL.
  - 3) Kondisi iklim dan lingkungan.
  - 4) Usia perkerasan.Contoh model prediksi adalah Markov Chain Models, Deterministic Models, dan Probabilistic Models.
- d. Analisis Alternatif Pemeliharaan  
Setelah kondisi jalan dianalisis, PMS menilai alternatif pemeliharaan dan rehabilitasi berdasarkan:
  - 1) Biaya.
  - 2) Efektivitas teknis.
  - 3) Dampak lalu lintas selama pelaksanaan.
  - 4) Umur layanan tambahan.
- e. Pengambilan Keputusan  
Pengambilan keputusan dalam *Pavement Management System* (PMS) didasarkan pada evaluasi biaya-manfaat (*cost-benefit analysis*) yang mempertimbangkan kondisi jalan, anggaran, dan tujuan pemeliharaan. Pendekatan ini menggunakan kriteria teknis seperti tingkat kerusakan, umur layanan, dan kapasitas lalu lintas untuk menentukan prioritas perbaikan. Algoritma optimasi seperti Linear Programming dan Genetic Algorithms digunakan untuk memproses data kompleks sehingga menghasilkan skema pemeliharaan yang efisien dan ekonomis.

### 3. Metode Evaluasi dalam PMS

Evaluasi kondisi jalan adalah inti dari PMS. Beberapa parameter evaluasi umum meliputi:

- a. *International Roughness Index* (IRI)

*International Roughness Index* (IRI) adalah metode evaluasi standar internasional yang digunakan untuk mengukur kekasaran permukaan jalan. IRI dihitung berdasarkan profil permukaan jalan yang diperoleh melalui alat pengukur profil (profilometer)

atau sensor khusus pada kendaraan uji. Nilai IRI dinyatakan dalam satuan meter per kilometer (m/km) atau inci per mil, yang mencerminkan tingkat kenyamanan berkendara. Semakin rendah nilai IRI, semakin halus permukaan jalan dan semakin baik kualitas perkerasan (Huang, 2004).

Penggunaan IRI sangat penting dalam *Pavement Management System* (PMS) karena memberikan data objektif terkait kondisi jalan secara kuantitatif. Data IRI memungkinkan perencana jalan untuk membandingkan performa berbagai segmen jalan, mengidentifikasi area yang memerlukan pemeliharaan, dan menetapkan prioritas perbaikan. Selain itu, IRI menjadi indikator penting dalam evaluasi efektivitas strategi rehabilitasi, sehingga membantu memastikan penggunaan anggaran pemeliharaan yang lebih efisien dan peningkatan keselamatan serta kenyamanan pengguna jalan.

b. *Pavement Condition Index (PCI)*

*Pavement Condition Index (PCI)* adalah metode evaluasi yang memberikan skor numerik untuk menilai kondisi jalan berdasarkan hasil inspeksi visual. Skor PCI berkisar dari 0 hingga 100, di mana nilai 100 menunjukkan kondisi jalan sempurna tanpa kerusakan, sedangkan nilai mendekati 0 menunjukkan kondisi jalan sangat buruk. Penilaian PCI dilakukan dengan mengidentifikasi jenis, tingkat keparahan, dan luas area kerusakan seperti retak, lubang, deformasi, atau distress permukaan lainnya (AASHTO, 2018). Metode ini memberikan gambaran yang jelas mengenai kondisi struktural dan permukaan jalan.

PCI merupakan alat penting dalam *Pavement Management System* (PMS) karena memungkinkan pengambilan keputusan berbasis data dalam perencanaan pemeliharaan dan rehabilitasi. Dengan PCI, pihak pengelola jalan dapat memprioritaskan perbaikan berdasarkan tingkat kerusakan dan anggaran yang tersedia. Selain itu, PCI membantu dalam memonitor perubahan kondisi jalan dari waktu ke waktu, sehingga strategi pemeliharaan dapat disesuaikan untuk meningkatkan umur layanan jalan dan efisiensi biaya pemeliharaan.

c. *Structural Number (SN)*

*Structural Number* (SN) adalah nilai numerik yang mencerminkan kapasitas struktural suatu perkerasan jalan untuk menahan beban lalu lintas selama umur layanan yang direncanakan. Nilai SN dihitung berdasarkan ketebalan lapisan perkerasan dan modulus elastisitas material penyusun lapisan tersebut. Semakin tinggi nilai SN, semakin besar kapasitas struktural perkerasan tersebut. Konsep ini digunakan secara luas dalam metode desain dan rehabilitasi jalan, khususnya pada metode AASHTO, untuk memastikan perkerasan memiliki kekuatan yang memadai terhadap beban lalu lintas.

Pada *Pavement Management System* (PMS), SN berperan penting sebagai indikator teknis untuk menentukan strategi pemeliharaan dan rehabilitasi. Dengan mengetahui nilai SN, insinyur jalan dapat mengevaluasi apakah perkerasan masih memenuhi kapasitas struktural yang dibutuhkan atau perlu dilakukan perbaikan. Analisis SN juga membantu dalam perencanaan biaya rehabilitasi, sehingga keputusan teknis dan finansial dapat diambil secara optimal untuk memperpanjang umur layanan jalan dan meminimalkan kerusakan di masa depan.

d. *Distress Identification*

*Distress Identification* adalah proses sistematis untuk mengenali dan memetakan berbagai jenis kerusakan pada perkerasan jalan, seperti retak (*cracking*), lubang (*potholes*), deformasi permukaan (*rutting*), dan pengelupasan lapisan permukaan (*surface stripping*). Proses ini biasanya dilakukan melalui inspeksi visual maupun metode penginderaan jarak jauh seperti penggunaan drone atau sistem imaging, untuk mendapatkan data kondisi jalan secara akurat. Tujuan dari distress identification adalah memberikan dasar teknis bagi evaluasi kondisi jalan dan menentukan prioritas pemeliharaan atau rehabilitasi (Kementerian PUPR, 2022).

Data hasil distress identification dimanfaatkan dalam *Pavement Management System* (PMS) untuk menyusun strategi pengelolaan jalan yang efektif. Informasi tersebut membantu mengidentifikasi tingkat keparahan dan luas area kerusakan, sehingga intervensi teknis dapat dilakukan secara tepat waktu dan efisien. Dengan pemetaan distress yang akurat, sumber daya

pemeliharaan dapat digunakan secara optimal untuk meningkatkan umur layanan jalan dan memastikan keselamatan pengguna jalan.

#### 4. Teknologi Pendukung PMS Modern

Seiring kemajuan teknologi, PMS kini semakin canggih dengan dukungan teknologi digital:

a. *Geographic Information System (GIS)*

Geographic Information System (GIS) adalah teknologi yang memungkinkan visualisasi dan analisis data spasial, termasuk kondisi jalan, dalam bentuk peta digital. Dalam *Pavement Management System* (PMS), GIS berperan penting untuk mengintegrasikan data teknis seperti kondisi perkerasan, lalu lintas, dan iklim dengan data lokasi jalan. Dengan menggunakan GIS, informasi dapat ditampilkan secara visual sehingga memudahkan identifikasi pola kerusakan, area kritis, dan prioritas pemeliharaan (Zhou et al., 2025).

GIS memungkinkan analisis spasial yang kompleks, seperti korelasi kondisi jalan dengan faktor lingkungan dan distribusi lalu lintas. Integrasi GIS dalam PMS mempermudah pengambilan keputusan berbasis data dan meningkatkan efisiensi alokasi sumber daya. Dengan pemetaan yang akurat, perencanaan pemeliharaan dan rehabilitasi dapat dilakukan secara tepat waktu, menurunkan biaya operasional, dan memperpanjang umur layanan jalan. GIS juga mendukung transparansi dan pelaporan kepada publik serta pemangku kepentingan.

b. *Internet of Things (IoT)*

*Internet of Things* (IoT) dalam *Pavement Management System* (PMS) menghadirkan revolusi dalam pemantauan kondisi jalan secara real-time. Sensor IoT yang dipasang pada permukaan atau lapisan perkerasan mampu mengumpulkan data kritis seperti deformasi, retakan, suhu, kelembaban, dan tekanan lalu lintas secara terus-menerus. Data ini memungkinkan pemantauan kondisi jalan yang lebih akurat dibandingkan metode inspeksi manual tradisional (Benmhahe & Chentoufi, 2021).

Keunggulan IoT adalah kemampuannya memberikan informasi secara langsung kepada sistem manajemen jalan sehingga proses

evaluasi dan pengambilan keputusan dapat dilakukan dengan cepat. Integrasi data IoT ke dalam PMS memudahkan identifikasi kerusakan dini dan perencanaan pemeliharaan prediktif. Selain meningkatkan efisiensi biaya, teknologi ini membantu memperpanjang umur layanan perkerasan. Penggunaan IoT juga memungkinkan integrasi dengan teknologi lain seperti GIS, sehingga kondisi jalan dapat dianalisis secara spasial dan temporal secara optimal.

c. *Machine Learning* dan AI

*Machine Learning* (ML) dan *Artificial Intelligence* (AI) telah menjadi komponen penting dalam *Pavement Management System* (PMS) modern. Teknologi ini memanfaatkan data historis kondisi jalan, lalu lintas, cuaca, dan hasil inspeksi untuk membangun model prediktif yang mampu memperkirakan degradasi perkerasan secara akurat. Dengan algoritma AI, PMS dapat mengidentifikasi pola kerusakan, memprediksi lokasi dan waktu kerusakan berikutnya, serta menentukan strategi pemeliharaan yang optimal.

Implementasi AI dalam PMS tidak hanya meningkatkan kecepatan analisis, tetapi juga memperkuat akurasi perencanaan pemeliharaan jalan. Sistem ini dapat menghasilkan rekomendasi otomatis berdasarkan analisis biaya-manfaat, sehingga pengelola jalan dapat membuat keputusan yang lebih efisien. Integrasi AI dengan teknologi lain seperti GIS dan IoT juga memungkinkan visualisasi kondisi jalan secara real-time, mendukung manajemen infrastruktur yang lebih proaktif dan berkelanjutan. Teknologi ini membantu memperpanjang umur layanan jalan sekaligus mengurangi biaya pemeliharaan jangka panjang.

d. Drone dan Remote Sensing

Drone dan teknologi remote sensing telah merevolusi proses evaluasi kondisi jalan dalam *Pavement Management System* (PMS) modern. Dengan dilengkapi kamera resolusi tinggi dan sensor LIDAR, drone mampu melakukan pemetaan permukaan jalan secara cepat dan detail tanpa mengganggu lalu lintas. Data yang diperoleh mencakup kondisi retak, deformasi, lubang, serta ketidakrataan permukaan, yang selanjutnya dianalisis untuk menentukan tingkat kerusakan.

Keunggulan teknologi ini terletak pada efisiensi waktu dan akurasi pengukuran. Pemanfaatan drone memungkinkan inspeksi area luas dalam waktu singkat, dengan hasil visual yang mudah diintegrasikan ke dalam sistem GIS. Selain itu, data yang diperoleh secara real-time mendukung pengambilan keputusan yang lebih cepat dan tepat dalam perencanaan pemeliharaan. Integrasi drone dan remote sensing dalam PMS menjadikan manajemen jalan lebih modern, efektif, dan berkelanjutan.





# **BAB IX**

## **EVALUASI DAN**

## **MONITORING KONDISI**

## **PERKERASAN**

---

---

Evaluasi dan monitoring kondisi perkerasan adalah tahap penting dalam manajemen infrastruktur jalan yang berfungsi untuk memastikan bahwa jalan tetap berfungsi sesuai standar keselamatan, kenyamanan, dan kinerja teknisnya. Proses ini membantu mengidentifikasi kerusakan atau penurunan kualitas perkerasan sejak dulu, sehingga memungkinkan tindakan pemeliharaan atau rehabilitasi yang tepat waktu. Dengan evaluasi yang baik, umur layanan perkerasan dapat diperpanjang dan biaya pemeliharaan dapat ditekan. Bab ini menekankan pentingnya metode evaluasi dan monitoring sebagai bagian integral dari siklus hidup perkerasan jalan.

Bab ini membahas metode evaluasi kondisi perkerasan, mulai dari survei visual dan manual, metode defleksi seperti *Falling Weight Deflectometer* (FWD) dan Benkelman Beam, hingga penggunaan indeks kondisi seperti *Pavement Condition Index* (PCI) dan *International Roughness Index* (IRI). Selain itu, bab ini juga membahas peran instrumentasi dan sensor modern serta integrasi teknologi *Geographic Information System* (GIS) dan *Internet of Things* (IoT) untuk monitoring kondisi jalan secara real-time. Pendekatan ini memungkinkan evaluasi yang lebih akurat dan berbasis data untuk pengambilan keputusan perawatan jalan yang lebih efisien.

## A. Survei Visual dan Manual

Survei visual dan manual adalah metode dasar yang digunakan dalam evaluasi kondisi perkerasan jalan. Metode ini merupakan langkah awal dalam sistem manajemen perkerasan (*Pavement Management System*, PMS) untuk mengidentifikasi jenis, lokasi, dan tingkat kerusakan perkerasan. Survei visual dan manual memiliki peran strategis dalam menentukan kebutuhan pemeliharaan atau rehabilitasi serta menjadi dasar pengambilan keputusan teknis (Tajudin, 2021). Meskipun teknologi modern seperti sensor otomatis, LiDAR, dan drone telah berkembang pesat, survei visual tetap menjadi metode penting karena kelebihan dalam kesederhanaan, fleksibilitas, dan biaya yang relatif rendah. Survei ini memberikan data kualitatif yang diperlukan untuk interpretasi kondisi jalan secara cepat dan dapat menjadi langkah awal sebelum analisis lebih lanjut menggunakan teknologi canggih. Survei visual berfokus pada identifikasi kerusakan permukaan, sedangkan survei manual dapat mencakup pengujian lapangan sederhana untuk menilai kondisi struktural.

### 1. Metode Survei Visual

#### a. Pendekatan Standar

Survei visual dilakukan dengan metode standar yang meliputi:

- 1) Pemeriksaan permukaan jalan secara langsung oleh teknisi.
- 2) Pengambilan foto kerusakan sebagai dokumentasi.
- 3) Pencatatan jenis dan luas kerusakan berdasarkan kategori standar.
- 4) Penggunaan formulir survei atau aplikasi berbasis digital untuk pencatatan data.

#### b. Kriteria Evaluasi

Kriteria evaluasi kerusakan dalam survei visual mencakup:

- 1) Jenis kerusakan (*distress type*): retak, lubang, deformasi.
- 2) Tingkat keparahan (*severity level*): rendah, sedang, tinggi.
- 3) Luas kerusakan (*extent*): persentase area yang rusak terhadap total luas perkerasan.

Standar ini biasanya mengacu pada panduan seperti *Pavement Condition Index* (PCI) dan *Distress Identification Manual* (Kementerian PUPR, 2022).

c. Alat dan Peralatan Survei Visual

Alat survei visual dapat sederhana, seperti:

- 1) Kamera atau smartphone untuk dokumentasi.
- 2) Formulir inspeksi manual atau aplikasi survei digital.
- 3) Alat pengukur jarak dan luas seperti pita ukur, wheel meter, atau GPS sederhana.

## 2. Metode Survei Manual

Survei manual melengkapi survei visual dengan pengukuran dan pengujian fisik kondisi perkerasan. Survei manual dapat mencakup:

a. Pengukuran Kekasarhan Permukaan

Metode survei manual untuk pengukuran kekasaran permukaan jalan umumnya dilakukan menggunakan alat seperti profilometer atau rut meter. Profilometer berfungsi mengukur profil permukaan jalan secara detail untuk mendapatkan nilai kekasaran, sedangkan rut meter digunakan untuk mengukur kedalaman deformasi jalur lalu lintas akibat penurunan permukaan. Data yang diperoleh dari alat-alat ini menjadi dasar untuk evaluasi kondisi perkerasan dan perencanaan pemeliharaan.

Salah satu parameter utama yang dihasilkan dari survei manual adalah *International Roughness Index* (IRI), yang merupakan standar internasional untuk menilai kekasaran permukaan jalan. IRI dihitung berdasarkan profil longitudinal jalan dan diungkapkan dalam satuan meter per kilometer (m/km). Nilai IRI yang tinggi menunjukkan permukaan jalan yang kasar dan memerlukan perbaikan. Meskipun metode manual memerlukan tenaga dan waktu, survei ini tetap penting untuk memperoleh data kondisi jalan yang akurat dan mendukung strategi pemeliharaan yang tepat.

b. Uji Penetrasi

Metode survei manual dengan uji penetrasi digunakan untuk menilai kondisi lapisan permukaan jalan serta menentukan kedalaman kerusakan yang terjadi. Uji ini membantu mengetahui kekuatan dan stabilitas lapisan perkerasan, khususnya lapisan subgrade dan base. Alat seperti *Dynamic Cone Penetrometer* (DCP) digunakan untuk mengukur resistensi tanah terhadap penetrasi kerucut baja pada berbagai kedalaman, sehingga

memberikan gambaran profil kekakuan dan kelemahan lapisan tanah.

Benkelman Beam juga sering digunakan, terutama untuk mengukur defleksi permukaan akibat beban. Hasil pengukuran ini menjadi indikator kondisi struktural perkerasan dan membantu dalam perencanaan rehabilitasi. Dengan data dari uji penetrasi, para insinyur dapat menentukan strategi perbaikan yang tepat, seperti penambahan ketebalan lapisan atau perbaikan subgrade. Meskipun memerlukan tenaga lapangan yang signifikan, metode ini memberikan informasi teknis yang vital untuk memastikan umur layanan jalan yang optimal.

c. Uji Kekakuan

Uji kekakuan pada perkerasan jalan dilakukan untuk menilai kemampuan lapisan perkerasan dalam menahan beban lalu lintas. Salah satu metode yang umum digunakan adalah *Falling Weight Deflectometer* (FWD), yang bekerja dengan memberikan beban impulsif pada permukaan jalan dan mengukur defleksi yang terjadi. Data defleksi ini memberikan gambaran tentang distribusi kekakuan lapisan perkerasan dan kondisi subgrade di bawahnya. Hasil pengujian FWD penting untuk memahami performa struktural jalan secara menyeluruh.

Data kekakuan yang diperoleh dari FWD digunakan untuk analisis mekanistik-empiris dalam menentukan kebutuhan rehabilitasi. Informasi ini membantu insinyur memilih metode perbaikan yang tepat, seperti overlay aspal, penggantian lapisan base, atau stabilisasi subgrade. Dengan demikian, uji kekakuan tidak hanya menjadi alat diagnostik, tetapi juga menjadi dasar perencanaan pemeliharaan yang efisien, meningkatkan umur layanan jalan sekaligus mengoptimalkan biaya perbaikan.

d. Pengukuran Tekstur Permukaan

Pengukuran tekstur permukaan perkerasan jalan merupakan langkah penting dalam memastikan keselamatan dan kenyamanan lalu lintas. Tekstur permukaan memengaruhi koefisien gesekan antara ban dan jalan, sehingga berdampak pada kemampuan penggereman, stabilitas kendaraan, dan pengendalian aquaplaning. Metode seperti Sand Patch Test digunakan untuk mengukur tekstur makro dengan cara menyebarkan pasir di permukaan jalan dan menghitung kedalaman rata-rata.

Sementara itu, Laser Texture Measurement memberikan data yang lebih presisi secara cepat dan dapat digunakan untuk evaluasi skala besar.

Informasi tekstur permukaan membantu dalam merencanakan pemeliharaan perkerasan, seperti pengaspalan ulang atau mikrotexturing. Jalan dengan tekstur yang baik meningkatkan keamanan pengguna jalan, terutama pada kondisi basah. Selain itu, tekstur permukaan juga berpengaruh terhadap kenyamanan berkendara, karena permukaan yang halus namun cukup kasar dapat mengurangi kebisingan dan getaran kendaraan. Oleh karena itu, pengukuran tekstur permukaan menjadi bagian integral dari manajemen kondisi jalan.

### 3. Prosedur Survei Visual dan Manual

Survei visual dan manual dilakukan melalui tahapan sebagai berikut:

a. Persiapan

Prosedur survei visual dan manual dimulai dengan tahap persiapan yang sangat penting untuk memastikan hasil survei akurat dan efisien. Pada tahap ini, tujuan survei harus ditetapkan terlebih dahulu, apakah untuk pemeliharaan rutin, rehabilitasi, atau audit kondisi jalan. Penentuan tujuan ini akan mempengaruhi metode dan parameter yang akan diukur selama survei.

Area survei dan rute inspeksi perlu direncanakan secara matang agar seluruh segmen jalan yang menjadi objek evaluasi dapat tercakup secara menyeluruh. Perencanaan ini termasuk menentukan titik awal dan akhir inspeksi, serta mempertimbangkan kondisi lalu lintas untuk meminimalkan gangguan. Selain itu, peralatan survei harus dipersiapkan sesuai kebutuhan, seperti profilometer, rut meter, *Dynamic Cone Penetrometer* (DCP), atau alat pengukur tekstur permukaan. Persiapan yang matang akan memastikan survei berjalan lancar, data yang diperoleh valid, serta proses pemeliharaan atau rehabilitasi dapat dilakukan secara tepat waktu.

b. Pelaksanaan

Pelaksanaan survei visual dan manual dilakukan oleh tim inspeksi yang bekerja secara sistematis sepanjang jaringan jalan

yang telah ditentukan sebelumnya. Tim melakukan penilaian kondisi jalan dengan mengamati berbagai aspek seperti permukaan jalan, keberadaan retak, deformasi, lubang, atau kerusakan lainnya. Penilaian dilakukan secara berurutan dan konsisten untuk memastikan semua segmen jalan tercakup. Metode ini membantu menghasilkan data yang representatif untuk analisis kondisi jalan secara menyeluruh.

Selama pelaksanaan, tim inspeksi juga melakukan dokumentasi kondisi jalan menggunakan foto, catatan lapangan, dan hasil pengukuran dari alat survei. Informasi ini dicatat secara detail agar memudahkan evaluasi lebih lanjut. Kerusakan yang ditemukan kemudian dikelompokkan berdasarkan jenis (misalnya retak, lubang, deformasi), tingkat keparahan, serta lokasi kerusakan. Pengelompokan ini penting untuk menentukan prioritas perbaikan, perencanaan pemeliharaan, dan strategi rehabilitasi yang efektif, sehingga dapat memperpanjang umur layanan jalan dengan biaya yang optimal.

c. Analisis Data

Setelah proses survei visual dan manual selesai, tahap selanjutnya adalah analisis data yang telah dikumpulkan. Data lapangan berupa foto, catatan, hasil pengukuran, dan pengelompokan kerusakan diolah secara sistematis untuk memperoleh gambaran menyeluruh mengenai kondisi jalan. Analisis ini melibatkan identifikasi pola kerusakan, distribusi tingkat keparahan, serta hubungan antara jenis kerusakan dengan faktor penyebabnya. Dengan demikian, hasil analisis menjadi dasar yang kuat untuk mengevaluasi kondisi jaringan jalan secara objektif.

Salah satu hasil penting dari analisis data ini adalah perhitungan *Pavement Condition Index* (PCI), yaitu skor numerik yang mencerminkan kondisi keseluruhan jalan. Nilai PCI digunakan sebagai acuan dalam pengambilan keputusan terkait pemeliharaan rutin atau rehabilitasi. Data analisis juga membantu otoritas jalan menentukan prioritas perbaikan, mengoptimalkan alokasi anggaran, dan merencanakan strategi jangka panjang. Dengan pendekatan ini, perawatan jalan dapat dilakukan lebih tepat, efisien, dan berkelanjutan.

## B. Metode Defleksi (FWD, Benkelman Beam)

Metode defleksi adalah teknik evaluasi kondisi struktural perkerasan jalan dengan mengukur respons perkerasan terhadap beban terkontrol. Defleksi memberikan informasi tentang kapasitas struktural lapisan perkerasan dan kondisi tanah dasar (*subgrade*). Data defleksi menjadi komponen penting dalam *Pavement Management System* (PMS) untuk perencanaan pemeliharaan dan rehabilitasi jalan (Hall & Schwartz, 2018). Perkerasan jalan dapat dianggap sebagai sistem berlapis (*layered system*) yang menanggapi beban lalu lintas dengan deformasi elastis. Defleksi adalah bentuk deformasi vertikal yang terjadi di permukaan jalan akibat beban tertentu. Metode defleksi memanfaatkan prinsip elastisitas untuk mengukur respons struktur perkerasan dan menilai kesehatan struktural jalan.

### 1. *Falling Weight Deflectometer* (FWD)

FWD adalah perangkat otomatis yang meniru beban kendaraan melalui beban jatuh (*falling weight*) dan mengukur defleksi yang dihasilkan pada permukaan perkerasan. Prinsipnya adalah menghasilkan beban impuls sebanding dengan beban kendaraan dan mengukur defleksi permukaan melalui sensor defleksi (*deflectometers*). Komponen utama FWD meliputi:

a. *Load plate*: mengaplikasikan beban pada permukaan perkerasan.

b. *Load cell*: mengukur besaran beban yang diterapkan.

c. *Geophones* atau *deflectometers*: sensor pengukur defleksi pada berbagai jarak dari pusat beban.

d. Sistem kendali dan data logger: merekam data pengukuran.

a. Prosedur Pengukuran FWD

1) Persiapan lokasi pengukuran dengan membersihkan permukaan jalan.

2) Penempatan FWD di lokasi pengukuran.

3) Pelepasan beban jatuh sesuai standar beban kendaraan yang ditargetkan.

4) Pengukuran defleksi pada berbagai radius di sekitar pusat beban.

5) Analisis data defleksi untuk mendapatkan parameter struktural perkerasan.

- b. Parameter yang Diukur
  - 1) Defleksi maksimum (*maximum deflection*).
  - 2) Pola defleksi pada berbagai radius (*deflection basin*).
  - 3) Modulus lapisan perkerasan (*layer moduli*).
- c. Keunggulan FWD
  - 1) Memberikan data kondisi struktural lapisan perkerasan secara akurat.
  - 2) Dapat digunakan pada berbagai jenis perkerasan (lentur, kaku, komposit).
  - 3) Memungkinkan analisis lanjutan seperti evaluasi umur sisa perkerasan dan rekomendasi rehabilitasi.
- d. Keterbatasan FWD
  - 1) Biaya peralatan dan operasional relatif tinggi.
  - 2) Membutuhkan operator terlatih.
  - 3) Tidak efektif untuk survei skala besar tanpa perencanaan rute yang efisien.

## 2. Benkelman Beam Deflection (BBD)

Benkelman Beam adalah alat mekanis sederhana yang digunakan untuk mengukur defleksi permukaan jalan akibat beban kendaraan standar (biasanya truk berat). Metode ini relatif murah dan banyak digunakan di negara berkembang. Komponen utama Benkelman Beam meliputi:

- a. Beam: balok logam dengan panjang tertentu yang diletakkan di permukaan jalan.
- b. Pendulum dan dial gauge: mengukur defleksi permukaan.
- c. Pivot point dan penyangga untuk kestabilan pengukuran.
- a. Prosedur Pengukuran BBD
  - 1) Persiapan lokasi pengukuran, biasanya dilakukan di tengah lajur jalan.
  - 2) Penempatan Benkelman Beam dengan pivot point pada tepi jalan.
  - 3) Kendaraan uji bergerak di jalur yang telah ditentukan untuk memberikan beban.
  - 4) Pencatatan defleksi maksimum menggunakan dial gauge.
  - 5) Pengulangan pengukuran di beberapa titik untuk memperoleh data representatif.

- b. Parameter yang Diukur
  - 1) Defleksi permukaan maksimum (*maximum deflection*).
  - 2) Distribusi defleksi di berbagai titik.
- c. Keunggulan Benkelman Beam
  - 1) Peralatan relatif sederhana dan murah.
  - 2) Mudah digunakan dan tidak memerlukan tenaga teknis khusus.
  - 3) Cocok untuk survei lapangan di jaringan jalan lokal dan pedesaan.
- d. Keterbatasan Benkelman Beam
  - 1) Menghasilkan data yang terbatas dibanding FWD.
  - 2) Tidak efektif pada kondisi lalu lintas tinggi karena harus memblokir jalur.
  - 3) Akurasi pengukuran tergantung pada pengalaman operator.

### **3. Perbandingan FWD dan Benkelman Beam**

Tabel 28. Perbandingan FWD dan Benkelman Beam

Aspek	FWD	Benkelman Beam
<b>Biaya</b>	Tinggi	Rendah
<b>Akurasi</b>	Tinggi	Sedang
<b>Kecepatan Survei</b>	Cepat	Lambat
<b>Kondisi Jalan</b>	Semua jenis, termasuk jalan tol	Jalan lokal, tidak cocok untuk lalu lintas tinggi
<b>Kompleksitas</b>	Tinggi, membutuhkan operator terlatih	Rendah, mudah digunakan
<b>Informasi</b>	Data defleksi lengkap dan analisis modulus	Defleksi permukaan saja

### **4. Aplikasi Metode Defleksi dalam Evaluasi Perkerasan**

- a. Penentuan Kondisi Struktural

Penentuan kondisi struktural perkerasan merupakan langkah penting dalam evaluasi umur layanan jalan. Metode defleksi, seperti penggunaan *Falling Weight Deflectometer* (FWD), memberikan data yang menggambarkan respons struktur perkerasan terhadap beban terapan. Data ini mencerminkan kekakuan lapisan perkerasan dan kemampuan distribusi beban ke

tanah dasar. Dengan informasi defleksi, insinyur dapat mengidentifikasi area yang mengalami penurunan kapasitas struktural atau deformasi berlebih sehingga memerlukan tindakan perbaikan.

Data defleksi berfungsi sebagai indikator awal kerusakan struktural sebelum kerusakan permukaan terlihat secara visual. Hal ini memungkinkan pengambilan keputusan yang lebih proaktif dalam pemeliharaan dan rehabilitasi jalan. Dengan evaluasi kondisi struktural berbasis defleksi, perencanaan perbaikan dapat dilakukan secara tepat waktu, mengurangi risiko kerusakan yang lebih parah, serta mengoptimalkan biaya pemeliharaan dan umur layanan jalan secara keseluruhan.

b. Prediksi Umur Layanan Perkerasan

Pengukuran defleksi pada perkerasan berperan penting dalam memprediksi umur layanan jalan. Data defleksi memberikan gambaran mengenai kondisi struktural lapisan perkerasan dan laju penurunan kekakuan akibat beban lalu lintas dan faktor lingkungan. Informasi ini kemudian dimasukkan ke dalam model degradasi perkerasan, seperti yang dikembangkan dalam metode AASHTO, untuk menghitung umur sisa perkerasan secara lebih akurat. Pendekatan ini memungkinkan prediksi yang berbasis data nyata, bukan hanya asumsi desain awal.

Dengan kemampuan memprediksi umur layanan, perencanaan pemeliharaan dan rehabilitasi dapat dilakukan secara lebih efisien. Hal ini membantu menghindari rehabilitasi dini yang tidak perlu maupun keterlambatan perbaikan yang dapat memperburuk kerusakan. Metode defleksi sebagai alat evaluasi tidak hanya memberikan data kondisi saat ini, tetapi juga memfasilitasi perencanaan strategis untuk mempertahankan kinerja perkerasan, memperpanjang umur layanan jalan, dan mengoptimalkan biaya pemeliharaan secara berkelanjutan.

c. Prioritas Pemeliharaan

Data defleksi menjadi instrumen penting dalam menentukan prioritas pemeliharaan jalan. Dengan mengukur besarnya defleksi pada berbagai titik jaringan jalan, pengelola dapat mengidentifikasi bagian perkerasan yang mengalami penurunan kapasitas struktural signifikan. Informasi ini kemudian digunakan untuk mengklasifikasikan kondisi jalan berdasarkan

tingkat keparahan kerusakan, sehingga upaya perbaikan dapat difokuskan pada area yang paling membutuhkan. Pendekatan ini memastikan penggunaan sumber daya pemeliharaan secara efisien dan tepat sasaran.

Data defleksi membantu menetapkan urgensi perbaikan. Jalan dengan defleksi tinggi biasanya menunjukkan tanda-tanda kelelahan struktural yang dapat berkembang menjadi kerusakan serius jika tidak segera ditangani. Dengan pemahaman yang jelas mengenai kondisi ini, pengelola jalan dapat merencanakan rehabilitasi secara strategis, menghindari biaya besar akibat kerusakan yang meluas, dan meningkatkan keselamatan pengguna jalan. Prioritas yang tepat akan meningkatkan efektivitas pemeliharaan dan memperpanjang umur layanan perkerasan secara keseluruhan.

d. Desain Rehabilitasi

Data defleksi berperan penting dalam desain rehabilitasi perkerasan. Nilai defleksi yang diperoleh dari pengukuran di lapangan memberikan gambaran mengenai kondisi struktural lapisan perkerasan yang ada. Informasi ini digunakan sebagai input dalam metode desain perkerasan lentur maupun kaku, untuk menentukan kebutuhan perbaikan. Dengan data defleksi, insinyur dapat menilai apakah lapisan perkerasan hanya memerlukan perbaikan tipis (*overlay*) atau rehabilitasi yang lebih mendalam, termasuk rekonstruksi lapisan bawah.

Penggunaan data defleksi dalam desain rehabilitasi membantu memastikan ketepatan tebal lapisan perbaikan sehingga struktur perkerasan yang direhabilitasi memiliki kapasitas beban yang optimal dan umur layanan yang sesuai. Pendekatan ini meningkatkan efisiensi penggunaan material dan biaya konstruksi. Dengan demikian, metode defleksi tidak hanya menjadi alat evaluasi kondisi jalan, tetapi juga menjadi panduan teknis yang krusial dalam merancang solusi rehabilitasi yang efektif dan berkelanjutan.

### C. Indeks Kondisi (PCI, IRI, dll.)

Indeks kondisi adalah metode kuantitatif yang digunakan untuk mengukur kualitas dan performa perkerasan jalan berdasarkan data

pengamatan lapangan. Indeks ini menyatukan informasi mengenai kerusakan permukaan (*surface distress*) dan kondisi struktural menjadi satu angka yang dapat digunakan untuk perbandingan kondisi jalan secara sistematis (AASHTO, 2018). Indeks kondisi yang paling umum digunakan adalah *Pavement Condition Index* (PCI) dan *International Roughness Index* (IRI). Selain itu, terdapat indeks lain seperti *Present Serviceability Index* (PSI) dan *Structural Condition Index* (SCI) yang digunakan di berbagai negara.

### **1. *Pavement Condition Index* (PCI)**

Menurut AASHTO (2018), *Pavement Condition Index* (PCI) adalah sistem pengukuran kondisi perkerasan jalan berbasis visual yang menghasilkan nilai antara 0 (kondisi buruk) hingga 100 (kondisi sempurna). PCI dikembangkan oleh U.S. Army Corps of Engineers dan menjadi standar internasional untuk evaluasi kondisi perkerasan jalan (ASTM D6433-20).

#### a. Metode Perhitungan

Metode PCI mengikuti tahapan:

- 1) Identifikasi jenis kerusakan: retak, lubang, deformasi permukaan, pengelupasan, dll.
- 2) Penilaian tingkat keparahan: rendah, sedang, tinggi.
- 3) Pengukuran luas kerusakan: persentase dari area perkerasan.
- 4) Penghitungan deduksi PCI berdasarkan tabel deduksi standar (*deduction tables*) yang mengacu pada panduan ASTM D6433-20.

Formula Umum:

$$PCI = 100 - \sum (\text{deduksi kerusakan})$$

#### b. Interpretasi Nilai PCI

- 1) PCI 85–100: Kondisi baik/sangat baik.
- 2) PCI 70–85: Kondisi sedang, memerlukan pemeliharaan ringan.
- 3) PCI 50–70: Kondisi menengah, memerlukan pemeliharaan sedang.
- 4) PCI <50: Kondisi buruk, memerlukan rehabilitasi atau rekonstruksi.

- c. Keunggulan PCI
  - 1) Standar internasional dengan metodologi yang jelas.
  - 2) Menghasilkan nilai numerik yang memudahkan perbandingan kondisi jalan.
  - 3) Dapat digunakan untuk jaringan jalan skala besar.
- d. Keterbatasan PCI
  - 1) Bersifat subjektif jika pengukuran visual tidak terstandarisasi.
  - 2) Tidak langsung mencerminkan kondisi struktural lapisan bawah.
  - 3) Membutuhkan tenaga ahli terlatih untuk identifikasi kerusakan secara akurat.

## **2. International Roughness Index (IRI)**

*International Roughness Index* (IRI) adalah parameter kuantitatif yang digunakan untuk mengukur kekasaran permukaan jalan berdasarkan profil longitudinal jalan. IRI dinyatakan dalam satuan meter per kilometer (m/km) atau inci per mil. IRI dikembangkan oleh World Bank untuk menstandarkan pengukuran kekasaran jalan di seluruh dunia (Sayers et al., 1986). IRI dihitung berdasarkan profil jalan yang diukur oleh profilometer atau perangkat pengukuran laser.

### a. Metode Pengukuran

Pengukuran IRI dapat dilakukan melalui:

- 1) Profilometer Jalan: alat mekanis atau laser untuk mengukur profil permukaan jalan.
- 2) Mobile Laser Scanning: menggunakan teknologi LiDAR untuk profil longitudinal.
- 3) Pemetaan menggunakan GPS dan accelerometer: memberikan data kekasaran permukaan secara real time.

### b. Interpretasi Nilai IRI

Menurut World Bank (2014):

- 1) IRI <2.0 m/km: Kondisi sangat baik.
- 2) IRI 2.0–4.0 m/km: Kondisi baik.
- 3) IRI 4.0–6.0 m/km: Kondisi sedang, memerlukan pemeliharaan.
- 4) IRI >6.0 m/km: Kondisi buruk, memerlukan rehabilitasi.

- c. Keunggulan IRI
  - 1) Menghasilkan nilai objektif dan kuantitatif.
  - 2) Memungkinkan evaluasi kenyamanan berkendara (*ride quality*).
  - 3) Data dapat diintegrasikan dengan PMS dan GIS.
- d. Keterbatasan IRI
  - 1) Tidak secara langsung mengidentifikasi jenis kerusakan.
  - 2) Memerlukan peralatan pengukuran canggih.
  - 3) Hanya mencerminkan kekasaran permukaan, bukan kondisi struktural lapisan bawah.

### **3. Present Serviceability Index (PSI)**

*Present Serviceability Index (PSI)* adalah indikator teknis yang digunakan untuk menilai kondisi layanan suatu perkerasan jalan berdasarkan kombinasi antara persepsi pengguna jalan dan parameter teknis. PSI mencerminkan kenyamanan, keamanan, dan efisiensi berkendara, sehingga menjadi ukuran penting dalam evaluasi performa jalan (AASHTO, 2018). Nilai PSI berkisar dari 0 (kondisi buruk) hingga 5 (kondisi sangat baik), yang menunjukkan tingkat kepuasan pengguna terhadap kondisi jalan.

PSI dihitung dengan mempertimbangkan beberapa parameter, termasuk kekasaran permukaan yang diukur melalui *International Roughness Index* (IRI), kondisi retak, deformasi, serta kepadatan lalu lintas. Semakin tinggi nilai PSI, semakin baik kondisi layanan perkerasan tersebut. Indeks ini membantu perencana dan pengelola jalan untuk memahami bagaimana kondisi teknis jalan berhubungan dengan pengalaman pengguna. Dengan demikian, PSI bukan sekadar angka teknis, tetapi juga indikator kualitas pelayanan transportasi publik dan keselamatan berkendara.

PSI digunakan sebagai input penting dalam sistem *Pavement Management System* (PMS) untuk menentukan prioritas pemeliharaan dan rehabilitasi jalan. Data PSI memungkinkan pengelola jalan mengambil keputusan berbasis bukti, menyesuaikan intervensi teknis dengan kebutuhan nyata di lapangan. Dengan penerapan PSI, perencanaan pemeliharaan menjadi lebih efisien, biaya perbaikan dapat diminimalkan, dan umur layanan jalan dapat diperpanjang, sehingga mendukung keberlanjutan infrastruktur transportasi.

#### **4. Structural Condition Index (SCI)**

*Structural Condition Index* (SCI) adalah indikator penting yang digunakan untuk menilai kondisi struktural perkerasan jalan. SCI dihitung berdasarkan data defleksi yang diperoleh dari alat seperti *Falling Weight Deflectometer* (FWD) atau Benkelman Beam, serta nilai modulus elastisitas lapisan perkerasan. Indeks ini memberikan gambaran mengenai kapasitas struktural jalan dalam menahan beban lalu lintas dan kondisi lingkungan selama masa layanannya. SCI memungkinkan penilaian yang lebih objektif dibandingkan evaluasi visual semata.

Penggunaan SCI membantu dalam memahami degradasi struktural perkerasan secara sistematis. Data defleksi yang akurat menunjukkan bagaimana lapisan perkerasan merespons beban lalu lintas, sehingga SCI dapat mengidentifikasi area yang mengalami penurunan kapasitas dukung. Nilai SCI yang rendah mengindikasikan perlunya intervensi rehabilitasi, sedangkan nilai tinggi menunjukkan kondisi struktural yang masih memadai. Dengan demikian, SCI menjadi parameter teknis yang sangat berguna dalam memprioritaskan pemeliharaan jalan.

SCI juga memiliki peran strategis dalam prediksi umur sisa jalan. Dengan analisis tren SCI dari waktu ke waktu, pengelola jalan dapat memproyeksikan kapan suatu perkerasan perlu direhabilitasi atau diperkuat. Hal ini memungkinkan pengelolaan infrastruktur yang lebih proaktif dan efisien, serta mengoptimalkan penggunaan anggaran pemeliharaan. SCI, ketika diintegrasikan dalam *Pavement Management System* (PMS), menjadi alat pengambilan keputusan yang vital untuk memastikan keberlanjutan jaringan jalan yang aman dan handal.

#### **5. Road Condition Index (RCI)**

*Road Condition Index* (RCI) merupakan alat evaluasi menyeluruh yang mengintegrasikan berbagai parameter teknis seperti *Pavement Condition Index* (PCI), *International Roughness Index* (IRI), dan data kondisi struktural. Integrasi ini menghasilkan satu nilai numerik yang menggambarkan kondisi keseluruhan jalan, memudahkan pengelola jalan dalam memahami kondisi infrastruktur secara komprehensif. RCI menjadi indikator penting dalam manajemen jalan modern karena mampu menggabungkan aspek kenyamanan, keselamatan, dan kesehatan struktural perkerasan (Zhou et al., 2025).

Metode perhitungan RCI memberikan gambaran yang lebih holistik dibandingkan penggunaan parameter tunggal. PCI menilai kondisi permukaan melalui inspeksi visual, IRI mengukur kekasaran permukaan sebagai indikator kenyamanan berkendara, sedangkan data kondisi struktural seperti SCI menunjukkan kapasitas dukung perkerasan. Kombinasi ketiga parameter ini dalam satu indeks mempermudah perbandingan kondisi jalan antar ruas maupun waktu evaluasi yang berbeda. RCI menjadi alat penting dalam prioritisasi pemeliharaan, karena memungkinkan fokus pada ruas jalan yang paling membutuhkan intervensi.

Penggunaan RCI juga mendukung pengambilan keputusan strategis pada tingkat nasional. Beberapa negara Eropa telah mengimplementasikan RCI dalam sistem manajemen jalan nasional untuk memantau dan merencanakan rehabilitasi jaringan jalan secara efisien. Dengan RCI, pengelola dapat merencanakan alokasi anggaran yang lebih tepat sasaran dan memastikan jalan tetap aman, nyaman, dan memiliki umur layanan optimal. Integrasi RCI ke dalam Pavement Management System menjadikannya standar evaluasi yang efektif untuk manajemen jalan berkelanjutan.

## D. Instrumentasi dan Sensor

Evaluasi dan monitoring kondisi perkerasan jalan modern tidak hanya mengandalkan survei visual atau metode defleksi seperti *Falling Weight Deflectometer* (FWD) atau Benkelman Beam. Perkembangan teknologi instrumentasi dan sensor telah memungkinkan pengukuran kondisi perkerasan secara real time, otomatis, dan akurat. Instrumentasi dan sensor ini memberikan data objektif mengenai kondisi struktural, deformasi, kelembaban, suhu, serta kondisi permukaan jalan (*surface distress*). Informasi ini menjadi komponen penting dalam sistem manajemen perkerasan (*Pavement Management System – PMS*) dan mendukung strategi pemeliharaan berbasis kondisi (*condition-based maintenance*). Berbagai jenis instrumentasi dan sensor digunakan untuk evaluasi kondisi perkerasan, antara lain:

### 1. Sensor Defleksi

Sensor defleksi mengukur deformasi vertikal pada permukaan jalan akibat beban lalu lintas. Contoh umum:

a. Geophone

Geophone adalah sensor yang digunakan pada *peralatan Falling Weight Deflectometer* (FWD) untuk mengukur defleksi permukaan perkerasan akibat beban uji. Sensor ini bekerja dengan mendeteksi getaran atau perpindahan kecil pada permukaan jalan ketika beban diterapkan, kemudian mengubahnya menjadi sinyal listrik yang dapat dianalisis. Data defleksi yang diperoleh dari geophone sangat penting untuk menilai kapasitas struktural perkerasan, menentukan kondisi subgrade, dan merencanakan rehabilitasi jalan. Keakuratan geophone menjadikannya komponen kunci dalam metode evaluasi struktural modern, memastikan keputusan perbaikan jalan didasarkan pada data yang valid dan terukur.

b. *Linear Variable Differential Transformer* (LVDT)

*Linear Variable Differential Transformer* (LVDT) adalah sensor presisi tinggi yang digunakan untuk mengukur pergeseran kecil pada permukaan jalan akibat beban uji, seperti pada metode *Falling Weight Deflectometer* (FWD). LVDT bekerja dengan prinsip induksi elektromagnetik untuk mendeteksi perubahan posisi inti sensor secara akurat, menghasilkan data defleksi yang sangat presisi. Informasi ini sangat penting dalam evaluasi kondisi struktural perkerasan, karena membantu menentukan modulus lapisan dan kapasitas dukung jalan. Keunggulan LVDT terletak pada sensitivitasnya terhadap perubahan defleksi yang sangat kecil, sehingga memastikan analisis performa jalan menjadi lebih akurat dan andal.

## 2. Sensor Tekanan dan Beban

Sensor ini digunakan untuk mengukur distribusi beban pada permukaan jalan, misalnya:

a. Load Cell

Load cell adalah sensor yang digunakan untuk mengukur beban tekan pada titik tertentu dengan akurasi tinggi. Prinsip kerjanya berdasarkan konversi gaya mekanis menjadi sinyal listrik melalui elemen strain gauge. Dalam evaluasi perkerasan jalan, load cell sering digunakan untuk memantau beban lalu lintas atau beban uji pada sistem pengujian seperti *Falling Weight Deflectometer* (FWD). Data beban ini penting untuk analisis respons struktural

perkerasan, termasuk perhitungan defleksi dan kapasitas dukung. Keunggulan load cell terletak pada kemampuannya memberikan pengukuran beban secara real-time dengan tingkat presisi yang tinggi, mendukung keputusan pemeliharaan yang efektif.

b. Pressure Pad

Pressure pad adalah sensor yang digunakan untuk mendeteksi dan merekam distribusi tekanan pada permukaan perkerasan. Sensor ini bekerja dengan merespons gaya tekan yang diterima pada area tertentu, kemudian mengubahnya menjadi sinyal listrik untuk dianalisis. Dalam evaluasi kondisi jalan, pressure pad berguna untuk memahami pola distribusi beban kendaraan dan memeriksa konsistensi kekakuan permukaan perkerasan. Data dari pressure pad membantu insinyur dalam merancang perkerasan yang lebih efisien dan aman, serta memprediksi titik-titik rawan kerusakan. Keunggulannya terletak pada kemampuannya memberikan analisis tekanan secara real-time dengan resolusi spasial tinggi.

### 3. Sensor Suhu

Suhu mempengaruhi sifat material perkerasan, terutama pada perkerasan lentur berbasis aspal. Sensor suhu mengukur suhu lapisan permukaan dan lapisan dalam:

a. Thermocouple

Thermocouple adalah sensor suhu presisi tinggi yang banyak digunakan dalam pemantauan kondisi perkerasan jalan. Sensor ini bekerja berdasarkan prinsip efek termoelektrik, di mana perbedaan suhu antara dua logam menghasilkan tegangan listrik yang dapat diukur. Dalam aplikasi perkerasan, thermocouple dipasang pada atau di dalam lapisan material untuk memantau perubahan suhu secara real-time. Data suhu ini penting untuk menganalisis pengaruh termal terhadap performa perkerasan, seperti ekspansi, kontraksi, atau risiko retak thermal. Keunggulan thermocouple terletak pada kecepatan responnya, akurasi tinggi, dan kemampuan bekerja pada rentang suhu yang luas.

b. Infrared Temperature Sensor

Infrared Temperature Sensor adalah alat yang mengukur suhu permukaan tanpa kontak langsung dengan objek, menggunakan radiasi inframerah yang dipancarkan oleh permukaan tersebut.

Sensor ini sangat berguna dalam pemantauan perkerasan jalan karena dapat mengukur suhu lapisan aspal atau beton secara cepat dan aman, tanpa mengganggu kondisi jalan. Teknologi ini memungkinkan pengambilan data suhu secara real-time dan pada area yang luas, membantu analisis performa perkerasan terkait perubahan suhu. Keunggulan infrared temperature sensor meliputi respons cepat, kemampuan pengukuran jarak jauh, dan kepraktisan dalam pemeliharaan serta evaluasi kondisi jalan.

#### 4. Sensor Kelembaban

Sensor kelembaban berperanan penting dalam evaluasi kondisi perkerasan jalan karena kelembaban memengaruhi modulus tanah dasar (*subgrade*) dan perilaku lapisan perkerasan secara keseluruhan. Tingginya kadar air pada subgrade dapat mengurangi kekakuan tanah, menyebabkan deformasi berlebih, dan mempercepat kerusakan jalan. Oleh karena itu, pengukuran kelembaban menjadi elemen penting dalam perencanaan pemeliharaan dan rehabilitasi perkerasan.

Teknologi seperti *Time Domain Reflectometry* (TDR) dan *Capacitive Moisture Sensor* memungkinkan pengukuran kadar air secara akurat pada tanah dasar maupun lapisan agregat. TDR menggunakan prinsip gelombang elektromagnetik untuk mendeteksi perubahan kelembaban, sementara sensor kapasitif mengukur perubahan kapasitansi akibat kadar air. Data kelembaban yang diperoleh dapat digunakan untuk memantau kondisi drainase perkerasan secara real-time, membantu pengelola jalan mengambil langkah preventif agar struktur jalan tetap optimal dan memiliki umur layanan yang lebih panjang.

#### 5. Sensor Kekasarahan Permukaan

Sensor ini digunakan untuk mengukur ride quality dan profil permukaan jalan. Contoh:

a. Laser Profilometer

Laser profilometer adalah alat presisi yang digunakan untuk mengukur profil longitudinal permukaan jalan secara akurat. Alat ini memanfaatkan teknologi laser untuk menangkap detail topografi permukaan jalan, termasuk lekukan, gelombang, dan ketidakteraturan lainnya. Data yang diperoleh digunakan untuk menghitung *International Roughness Index* (IRI), indikator

standar internasional yang mengukur kekasaran permukaan jalan. IRI menjadi parameter penting dalam evaluasi kenyamanan berkendara dan kinerja perkerasan. Penggunaan laser profilometer memungkinkan pengukuran dilakukan secara cepat, non-destruktif, dan dengan akurasi tinggi, sehingga menjadi alat vital dalam manajemen kondisi jalan modern.

b. 3D Road Surface Scanner

3D road surface scanner adalah teknologi canggih yang menggunakan sensor optik dan laser untuk menghasilkan model digital permukaan jalan dengan detail tinggi. Alat ini mampu memetakan tekstur, profil, dan deformasi permukaan jalan secara akurat dalam format tiga dimensi. Data yang dihasilkan digunakan untuk analisis kekasaran permukaan, identifikasi kerusakan seperti retak atau lubang, serta perencanaan pemeliharaan. Menurut Zhou et al. (2025), teknologi ini memungkinkan inspeksi jalan dilakukan secara cepat, non-destruktif, dan efisien, bahkan pada area yang sulit dijangkau. Hasilnya mendukung pengelolaan jalan yang berbasis data dan presisi tinggi.

## 6. Sensor Retakan dan Distress

Teknologi sensor optik dan citra digunakan untuk mendeteksi retakan (*cracks*) dan deformasi permukaan:

a. *Digital Imaging Sensor*

*Digital imaging sensor* adalah perangkat kamera resolusi tinggi yang digunakan untuk mengambil gambar permukaan jalan dengan tingkat detail yang sangat baik. Teknologi ini memungkinkan identifikasi retakan, lubang, deformasi, dan jenis distress lainnya secara visual dan akurat. Data citra yang diperoleh dapat diproses menggunakan perangkat lunak analisis citra untuk mengukur dimensi kerusakan dan tingkat keparahannya. Menurut penelitian terbaru, penggunaan digital imaging sensor meningkatkan efisiensi inspeksi jalan karena memungkinkan pemantauan kondisi secara cepat tanpa kontak langsung. Teknologi ini menjadi bagian penting dalam sistem manajemen perkerasan modern yang berbasis data.

b. *Machine Vision System*

*Machine Vision System* adalah teknologi berbasis kecerdasan buatan (AI) yang dirancang untuk mendeteksi retakan, lubang, dan kerusakan permukaan jalan secara otomatis. Sistem ini menggunakan kamera beresolusi tinggi yang terintegrasi dengan algoritma pengolahan citra untuk mengenali pola distress pada perkerasan. Data yang diperoleh dianalisis secara real-time, memungkinkan identifikasi kerusakan dengan akurasi tinggi tanpa intervensi manual. Penggunaan Machine Vision System mempercepat proses inspeksi jalan, mengurangi biaya operasional, dan meningkatkan efektivitas perawatan jalan dengan memberikan data evaluasi kondisi yang lebih cepat dan presisi.

## E. Integrasi Teknologi GIS dan IoT

Perkembangan teknologi informasi dan komunikasi telah membawa perubahan signifikan pada evaluasi dan monitoring kondisi perkerasan jalan. *Integrasi Geographic Information System (GIS)* dan *Internet of Things (IoT)* menjadi landasan bagi sistem pemantauan jalan modern (*Smart Pavement Monitoring*) yang memungkinkan pengelolaan kondisi perkerasan secara real time, akurat, dan berbasis data. GIS memberikan kerangka kerja untuk pengolahan dan analisis data spasial, sedangkan IoT menyediakan jaringan sensor dan perangkat yang mengumpulkan data kondisi jalan secara otomatis. Kombinasi keduanya menghasilkan data-driven pavement management yang meningkatkan efektivitas perencanaan pemeliharaan (*condition-based maintenance*) dan pengambilan keputusan strategis (Zhou et al., 2025).

### 1. GIS dalam Evaluasi Perkerasan Jalan

GIS adalah sistem informasi yang mengelola data berbasis lokasi (spatial data) untuk keperluan analisis, visualisasi, dan pengambilan keputusan (Longley et al., 2015). GIS digunakan untuk:

- a. Memetakan kondisi jalan berdasarkan hasil survei (PCI, IRI, SCI).
- b. Mengintegrasikan data dari berbagai sumber, seperti sensor IoT, hasil survei visual, dan data lalu lintas.

- c. Menyediakan analisis spasial untuk identifikasi daerah prioritas pemeliharaan.
- d. Membantu pengambilan keputusan berbasis lokasi.

Data GIS yang digunakan dalam evaluasi perkerasan mencakup:

- a. Lokasi jalan (*geospatial coordinates*).
- b. Tipe perkerasan dan spesifikasi teknis.
- c. Data kerusakan jalan (*distress type, severity*).
- d. Data lalu lintas.
- e. Data lingkungan (curah hujan, suhu, kelembaban).

## 2. IoT dalam Evaluasi Perkerasan Jalan

IoT adalah jaringan perangkat fisik (*things*) yang dilengkapi sensor, perangkat lunak, dan koneksi jaringan untuk mengumpulkan, mengirim, dan menganalisis data (Atzori et al., 2017). IoT memungkinkan:

- a. Pengumpulan data kondisi perkerasan secara real time.
- b. Pemantauan parameter struktural dan lingkungan seperti kelembaban, suhu, defleksi, dan kekasaran permukaan.
- c. Integrasi data sensor ke platform GIS untuk analisis spasial.
- d. Pengembangan *smart pavement management system*.

Komponen IoT untuk pavement monitoring sebagai berikut:

- a. Sensor Jalan: mengukur parameter kondisi perkerasan seperti suhu, kelembaban, defleksi, tekanan beban, dan retakan.
- b. Gateway IoT: mengumpulkan data dari sensor dan mengirimkan ke server.
- c. Platform Data dan Analisis: mengolah data sensor menjadi informasi kondisi jalan.
- d. Antarmuka Pengguna (*User Interface*): dashboard GIS untuk visualisasi data dan pengambilan keputusan.

## 3. Integrasi GIS dan IoT untuk Monitoring Kondisi Jalan

Integrasi GIS dan IoT menciptakan sistem *Smart Pavement Management*, dengan arsitektur umum seperti berikut:

- a. Layer Data IoT: sensor mengumpulkan data kondisi jalan secara real time.
- b. Layer Komunikasi: data sensor dikirim melalui jaringan IoT (4G/5G, LoRaWAN, NB-IoT) ke server pusat.

- c. Layer GIS: data sensor diproses dan ditampilkan dalam format peta interaktif berbasis lokasi.
- d. Layer Analisis dan Prediksi: algoritma AI memproses data untuk prediksi kondisi jalan dan kebutuhan pemeliharaan.
- e. Layer Keputusan: hasil analisis digunakan oleh manajer jalan untuk perencanaan dan eksekusi pemeliharaan.

Fungsi integrasi GIS dan IoT diantaranya:

- a. Memantau kondisi perkerasan secara real time.
- b. Mengidentifikasi daerah yang memerlukan perbaikan segera.
- c. Menyediakan data untuk evaluasi kinerja jalan jangka panjang.
- d. Mendukung keputusan pemeliharaan berbasis kondisi dan prediksi (*predictive maintenance*).

#### 4. Strategi Pengembangan GIS-IoT dalam *Pavement Management*

Untuk mengatasi tantangan tersebut, strategi pengembangan meliputi:

- a. Pengembangan Standar Nasional

Pengembangan standar nasional untuk integrasi GIS-IoT dalam *Pavement Management System* (PMS) merupakan langkah strategis untuk memastikan konsistensi, akurasi, dan interoperabilitas data jalan di seluruh Indonesia. Standar ini mencakup pedoman teknis terkait format data, protokol komunikasi, dan metode kalibrasi sensor, serta prosedur operasional yang harus diikuti dalam pengumpulan, pemrosesan, dan analisis data kondisi jalan (Kementerian PUPR, 2022). Dengan adanya standar nasional, berbagai instansi terkait dapat menggunakan data GIS-IoT secara terpadu dan efisien, sehingga meningkatkan koordinasi dalam perencanaan pemeliharaan dan rehabilitasi jalan.

Pengembangan standar nasional ini juga mendorong penggunaan teknologi secara optimal dan aman. Standar teknis memastikan bahwa perangkat IoT dan sistem GIS yang digunakan memenuhi kriteria kualitas dan kompatibilitas, sementara prosedur operasional menetapkan langkah-langkah kerja yang jelas untuk pengelolaan data. Hal ini sangat penting untuk menghasilkan informasi yang akurat, dapat diandalkan, dan relevan bagi pengambilan keputusan strategis dalam manajemen perkerasan.

jalan, sehingga dapat meningkatkan efektivitas dan efisiensi program pemeliharaan jalan nasional.

b. Investasi Infrastruktur Sensor

Investasi infrastruktur sensor dalam *Pavement Management System* (PMS) merupakan langkah krusial untuk meningkatkan akurasi pemantauan kondisi jalan secara real-time. Pemasangan sensor seperti kelembaban, suhu, defleksi, dan citra pada ruas jalan prioritas memungkinkan pengumpulan data yang detail dan kontinu mengenai performa perkerasan. Sensor kelembaban dan suhu membantu memantau kondisi lingkungan yang memengaruhi sifat material jalan, sedangkan sensor defleksi mengukur respons struktural terhadap beban lalu lintas. Sensor citra, terutama yang dilengkapi teknologi AI, memungkinkan deteksi dini retakan atau kerusakan permukaan tanpa perlu inspeksi manual yang memakan waktu.

Investasi ini membutuhkan perencanaan yang matang, termasuk pemilihan lokasi pemasangan yang strategis pada ruas jalan dengan volume lalu lintas tinggi atau kondisi iklim ekstrem. Selain biaya pemasangan, perlu diperhitungkan biaya pemeliharaan dan integrasi data sensor ke dalam sistem GIS-IoT. Dengan investasi yang tepat, data sensor dapat digunakan untuk analisis prediktif, sehingga manajemen jalan menjadi lebih proaktif. Pendekatan ini tidak hanya meningkatkan umur layanan perkerasan, tetapi juga mengoptimalkan biaya pemeliharaan jangka panjang dan meningkatkan keselamatan pengguna jalan.

c. Pengembangan Platform Data Terpadu

Pengembangan platform data terpadu dalam *Pavement Management System* (PMS) adalah langkah strategis untuk mengoptimalkan penggunaan data dari sensor IoT. Integrasi data kelembaban, suhu, defleksi, citra, dan parameter teknis lainnya ke dalam dashboard GIS interaktif memungkinkan visualisasi kondisi jalan secara real-time. Dashboard ini mempermudah pengelola jalan untuk memantau performa perkerasan, mengidentifikasi kerusakan, serta merencanakan tindakan pemeliharaan atau rehabilitasi secara efisien. Integrasi ini juga memungkinkan analisis spasial yang membantu memahami distribusi kerusakan dan pola degradasi pada jaringan jalan.

Platform terpadu ini juga memfasilitasi kolaborasi antarinstansi terkait dalam manajemen jalan. Dengan tampilan visual yang mudah dipahami, pengambilan keputusan dapat dilakukan secara cepat dan berbasis data. Selain itu, data historis yang tersimpan memungkinkan analisis tren kondisi jalan dari waktu ke waktu. Hal ini penting untuk strategi pemeliharaan prediktif yang mengutamakan efisiensi biaya dan peningkatan umur layanan perkerasan. Dengan demikian, pengembangan platform GIS-IoT menjadi fondasi penting dalam manajemen jalan modern yang cerdas dan berkelanjutan.

d. Pelatihan SDM

Pelatihan sumber daya manusia (SDM) menjadi komponen krusial dalam strategi pengembangan GIS-IoT untuk *Pavement Management System* (PMS). Sistem GIS-IoT yang canggih memerlukan pengoperasian yang tepat agar data yang diperoleh akurat dan bermanfaat. Oleh karena itu, pengembangan kompetensi teknis bagi petugas dan pengelola jalan mencakup pelatihan penggunaan perangkat sensor, pengolahan data, interpretasi hasil analisis, serta pengoperasian platform GIS interaktif. Pelatihan ini memastikan bahwa teknologi tidak hanya tersedia, tetapi juga digunakan secara optimal untuk meningkatkan efektivitas manajemen perkerasan jalan.

Pelatihan SDM juga perlu mencakup pemahaman konsep manajemen data dan pemeliharaan berbasis teknologi. Hal ini memungkinkan petugas memahami pentingnya data real-time dalam pengambilan keputusan strategis. Penguatan kapasitas SDM juga mendorong adopsi teknologi baru secara berkelanjutan. Dengan demikian, pelatihan menjadi fondasi penting untuk memastikan keberhasilan implementasi GIS-IoT dalam manajemen jalan yang lebih cerdas, efektif, dan berkelanjutan.

e. Kolaborasi Multi-Stakeholder

Kolaborasi multi-stakeholder menjadi strategi penting dalam pengembangan GIS-IoT untuk *Pavement Management System* (PMS). Sinergi antara pemerintah, akademisi, dan industri teknologi memungkinkan penggabungan keahlian teknis, kebijakan, dan inovasi riset. Pemerintah berperan dalam penyediaan regulasi, pendanaan, dan arah strategis, sementara

akademisi menyediakan penelitian berbasis bukti dan pengembangan teknologi baru. Industri teknologi berkontribusi melalui inovasi sensor, sistem integrasi data, dan solusi analitik berbasis AI, sehingga menghasilkan sistem GIS-IoT yang lebih efektif dan adaptif terhadap kebutuhan pengelolaan jalan.

Kolaborasi ini juga membuka peluang bagi pengembangan standar nasional yang terintegrasi dan berbasis praktik terbaik. Melalui kerja sama, sumber daya dapat dimanfaatkan secara optimal, mulai dari riset laboratorium hingga implementasi di lapangan. Selain itu, kolaborasi lintas sektor meningkatkan kapasitas inovasi dan mempercepat adopsi teknologi baru. Pendekatan ini memastikan bahwa pengembangan GIS-IoT tidak hanya bersifat teknis, tetapi juga berkelanjutan secara sosial, ekonomi, dan lingkungan.

# BAB X

# TANTANGAN MASA DEPAN DAN INOVASI TEKNOLOGI

---

---

Perkerasan jalan sebagai elemen vital infrastruktur transportasi menghadapi berbagai tantangan signifikan di masa depan. Pertumbuhan volume lalu lintas, perubahan iklim, kebutuhan akan transportasi ramah lingkungan, serta perkembangan teknologi kendaraan modern seperti kendaraan listrik dan otonom menuntut inovasi dalam perancangan dan pengelolaan perkerasan. Selain itu, keterbatasan sumber daya dan tekanan biaya konstruksi serta pemeliharaan mendorong penerapan teknologi baru yang lebih efisien, tahan lama, dan ramah lingkungan. Bab ini membahas tren, tantangan, dan inovasi yang akan membentuk masa depan perkerasan jalan.

Bab ini membahas berbagai inovasi teknologi dalam perkerasan jalan, seperti *green pavement* yang menggunakan material ramah lingkungan, *smart pavement* berbasis sensor, serta teknologi modular dan prefabrikasi. Selain itu, pembahasan mencakup perkerasan yang dirancang untuk kendaraan listrik dan otonom, serta teknologi daur ulang material jalan (*recycling*) yang berkontribusi pada keberlanjutan. Bab ini menekankan bahwa inovasi ini tidak hanya bersifat teknis tetapi juga memerlukan pendekatan strategis dalam integrasi kebijakan, desain, konstruksi, dan pemeliharaan perkerasan.

## A. *Green Pavement* dan Teknologi Berkelanjutan

Industri konstruksi perkerasan jalan menghadapi tantangan besar di abad ke-21, yaitu kebutuhan untuk mengurangi dampak lingkungan,

meningkatkan efisiensi sumber daya, dan memastikan keberlanjutan infrastruktur jalan (*sustainable infrastructure*) (Hossain et al., 2022). Konsep *Green Pavement* atau perkerasan ramah lingkungan menjadi salah satu arah inovasi teknologi yang penting dalam bidang ini. *Green Pavement* merujuk pada konsep perkerasan yang meminimalkan dampak lingkungan selama siklus hidupnya, mulai dari tahap desain, konstruksi, hingga pemeliharaan dan rehabilitasi. Pendekatan ini menggabungkan penggunaan material daur ulang, teknologi efisiensi energi, serta metode konstruksi yang ramah lingkungan.

## 1. Konsep *Green Pavement*

*Green Pavement* adalah sistem perkerasan jalan yang dirancang dengan mempertimbangkan prinsip keberlanjutan, termasuk aspek lingkungan, ekonomi, dan sosial. Hal ini mencakup:

- a. Penggunaan material ramah lingkungan.
- b. Reduksi emisi karbon selama konstruksi dan penggunaan jalan.
- c. Pengelolaan sumber daya secara efisien.
- d. Perpanjangan umur perkerasan.

Tujuan utama *Green Pavement* adalah:

- a. Mengurangi emisi gas rumah kaca (*carbon footprint*).
- b. Menghemat penggunaan sumber daya alam.
- c. Meningkatkan efisiensi energi.
- d. Meminimalkan limbah konstruksi.
- e. Menjamin keamanan dan kenyamanan pengguna jalan.

Desain *Green Pavement* mengacu pada prinsip-prinsip berikut:

- a. *Sustainable Material Selection*: penggunaan material daur ulang dan material lokal.
- b. *Energy Efficiency*: pengurangan energi dalam proses produksi dan konstruksi.
- c. *Durability*: peningkatan umur pakai perkerasan untuk mengurangi kebutuhan perbaikan.
- d. *Recyclability*: penggunaan material yang dapat didaur ulang kembali.
- e. *Environmental Protection*: meminimalkan dampak lingkungan seperti polusi dan degradasi tanah.

## 2. Material Berkelanjutan dalam *Green Pavement*

Penggunaan material berkelanjutan merupakan elemen utama dalam *Green Pavement*. Beberapa inovasi material berkelanjutan meliputi:

a. *Reclaimed Asphalt Pavement (RAP)*

RAP adalah material aspal bekas yang dihancurkan dan digunakan kembali dalam campuran perkerasan. Keuntungan penggunaan RAP:

- 1) Mengurangi kebutuhan material baru.
- 2) Mengurangi emisi CO<sub>2</sub> dari proses produksi.
- 3) Menghemat biaya konstruksi.

b. *Geosynthetics*

Geosynthetics seperti geotextile, geomembrane, dan geogrid digunakan dalam perkerasan untuk:

- 1) Meningkatkan stabilitas lapisan perkerasan.
- 2) Mengurangi kebutuhan bahan agregat.
- 3) Memperpanjang umur jalan.

c. *Material Hijau (Eco-friendly Binders)*

Material hijau mencakup binder aspal yang dimodifikasi menggunakan bahan alami atau daur ulang, seperti:

- 1) Bio-binder: aspal modifikasi berbasis biomassa.
- 2) *Warm Mix Asphalt (WMA)*: teknologi pencampuran aspal pada suhu rendah untuk mengurangi emisi.

d. *Beton Ramah Lingkungan*

Beton ramah lingkungan menjadi salah satu inovasi penting dalam konsep *green pavement*, khususnya pada perkerasan kaku. Penggunaan material substitusi seperti fly ash, slag, dan silica fume dapat mengurangi ketergantungan pada semen Portland, yang diketahui memiliki emisi karbon tinggi dalam proses produksinya. Selain ramah lingkungan, bahan-bahan tambahan ini juga mampu meningkatkan durabilitas beton, memperbaiki sifat mekanis, serta memperpanjang umur layanan perkerasan. Dengan demikian, penerapan beton ramah lingkungan tidak hanya mendukung pengurangan jejak karbon, tetapi juga meningkatkan efisiensi biaya pemeliharaan jalan dalam jangka panjang (Kementerian PUPR, 2022).

### **3. Teknologi Berkelanjutan dalam Proses Konstruksi Perkerasan**

#### **a. *Warm Mix Asphalt* (WMA)**

Teknologi WMA memungkinkan pencampuran dan pemasatan campuran aspal pada suhu 20–40°C lebih rendah dibanding *Hot Mix Asphalt* (HMA). Keuntungan WMA:

- 1) Mengurangi konsumsi energi hingga 20%.
- 2) Mengurangi emisi gas rumah kaca.
- 3) Memperpanjang umur peralatan konstruksi.

#### **b. *Cold In-Place Recycling* (CIR)**

CIR adalah teknologi daur ulang perkerasan di tempat (in-situ), yang melibatkan penghancuran lapisan perkerasan lama, pencampuran dengan bahan pengikat, dan pemasatan kembali.

Keuntungan CIR:

- 1) Menghemat bahan baru.
- 2) Mengurangi limbah konstruksi.
- 3) Mempercepat proses konstruksi.

#### **c. Perkerasan Porous Asphalt**

Porous asphalt merupakan teknologi berkelanjutan yang dirancang dengan struktur berongga sehingga memungkinkan air hujan meresap langsung ke lapisan bawah perkerasan. Dengan kemampuan ini, porous asphalt efektif mengurangi genangan air di permukaan jalan, yang sering menjadi penyebab banjir perkotaan (*urban flooding*) sekaligus meningkatkan keselamatan pengguna jalan karena risiko aquaplaning berkurang secara signifikan. Selain itu, sistem ini juga mendukung pengisian ulang air tanah dan menjaga keseimbangan hidrologi lingkungan perkotaan. Oleh karena itu, penerapan porous asphalt menjadi solusi inovatif yang ramah lingkungan sekaligus fungsional dalam konstruksi jalan modern (Huang, 2004).

#### **d. Penggunaan Sensor dan IoT**

Penggunaan sensor dan teknologi *Internet of Things* (IoT) dalam konstruksi perkerasan berkelanjutan memungkinkan pemantauan kondisi jalan secara real time dengan tingkat akurasi tinggi. Sensor dapat merekam data terkait suhu, kelembaban, retakan, hingga deformasi struktural, yang kemudian terintegrasi dalam sistem manajemen berbasis data. Informasi ini memudahkan pengelola jalan untuk melakukan pemeliharaan prediktif, sehingga kerusakan dapat dicegah sebelum menjadi parah.

Dengan demikian, umur layanan perkerasan dapat diperpanjang, biaya rehabilitasi besar berkurang, dan efisiensi anggaran terjamin. Inovasi ini sejalan dengan prinsip *green pavement* yang menekankan efektivitas sekaligus keberlanjutan.

#### 4. Evaluasi Keberlanjutan *Green Pavement*

Keberhasilan implementasi *Green Pavement* diukur berdasarkan beberapa indikator keberlanjutan:

- a. *Carbon Footprint*: pengurangan emisi CO<sub>2</sub> selama siklus hidup jalan.
- b. *Material Efficiency*: persentase penggunaan material daur ulang.
- c. Energi Efisiensi: pengurangan konsumsi energi konstruksi.
- d. Umur Jalan: peningkatan umur pakai jalan sebelum rehabilitasi.
- e. Biaya Siklus Hidup (*Life Cycle Costing*): evaluasi biaya total dari desain, konstruksi, pemeliharaan, dan rehabilitasi.

Tabel 29. Indikator Keberlanjutan *Green Pavement*

Indikator	Ukuran
Carbon Footprint	Emisi CO <sub>2</sub> (kg CO <sub>2</sub> eq/km jalan)
Material Efficiency	% material daur ulang
Energi Efisiensi	Konsumsi energi per m <sup>2</sup> jalan
Umur Jalan	Tahun sebelum rehabilitasi
Biaya Siklus Hidup	Rp/m <sup>2</sup> jalan

Sumber: Hossain et al. (2022)

#### B. *Smart Pavement* dan Jalan Berbasis Sensor

Di era revolusi industri 4.0, pembangunan infrastruktur jalan tidak lagi hanya berfokus pada ketahanan struktural, tetapi juga pada aspek intelligent infrastructure. *Smart pavement* adalah konsep inovatif di bidang transportasi yang memanfaatkan teknologi sensor, komunikasi digital, dan analisis data untuk meningkatkan fungsi, keselamatan, dan keberlanjutan perkerasan jalan. *Smart pavement* bukan sekadar permukaan jalan, tetapi jaringan pavement system yang dapat “merasakan” kondisi sekitarnya dan merespons secara otomatis terhadap kondisi lalu lintas dan lingkungan. Konsep ini memanfaatkan teknologi *Internet of Things* (IoT), sensor pintar, dan data analytics untuk meningkatkan performa dan manajemen jalan (Atzori et al., 2017).

## **1. Konsep *Smart Pavement***

*Smart pavement* adalah perkerasan jalan yang dilengkapi dengan sistem sensor dan perangkat komunikasi digital untuk mengukur dan melaporkan kondisi jalan secara real time, termasuk:

- a. Keausan dan kerusakan perkerasan.
- b. Beban lalu lintas.
- c. Kondisi lingkungan (suhu, kelembaban, curah hujan).
- d. Interaksi kendaraan.

Konsep ini merupakan bagian dari *Intelligent Transportation System* (ITS), yang bertujuan meningkatkan efisiensi transportasi dan keselamatan. *Smart pavement* berfungsi untuk:

- a. Monitoring kondisi jalan secara real time.
- b. Peningkatan keselamatan dengan deteksi dini kondisi jalan buruk.
- c. Optimasi pemeliharaan berbasis kondisi (*condition-based maintenance*).
- d. Integrasi dengan kendaraan pintar (*connected vehicles*).
- e. Pengurangan biaya operasional jangka panjang.

## **2. Teknologi Sensor pada *Smart Pavement***

Sensor merupakan komponen inti *smart pavement*. Sensor ini mengumpulkan data yang dikirim ke pusat pengelolaan menggunakan jaringan IoT. Teknologi sensor yang digunakan meliputi:

- a. Sensor Strain dan Stress

Sensor strain dan stress merupakan komponen penting dalam sistem *smart pavement* karena mampu memantau deformasi struktural akibat beban lalu lintas. Sensor ini dapat berupa strain gauge konvensional atau fiber optic sensors yang memiliki sensitivitas tinggi dan tahan terhadap kondisi lingkungan ekstrem. Dengan dipasang pada lapisan perkerasan, sensor ini mencatat respon material terhadap beban dinamis kendaraan, sehingga memberikan gambaran langsung mengenai distribusi tegangan dan regangan pada struktur jalan. Teknologi ini membantu mendeteksi potensi kerusakan dini, seperti retak akibat kelelahan (*fatigue*), sebelum berkembang menjadi kerusakan besar yang membutuhkan biaya perbaikan tinggi.

Data strain dan stress yang diperoleh dari sensor juga menjadi input penting dalam analisis umur sisa jalan. Melalui pemodelan

fatigue dan evaluasi siklus beban, pengelola jalan dapat memperkirakan kapan pemeliharaan atau rehabilitasi harus dilakukan. Pendekatan prediktif ini mendukung strategi manajemen jalan yang lebih efisien, karena pemeliharaan dapat dilakukan secara tepat waktu dan sesuai kebutuhan aktual.

b. Sensor Temperatur

Sensor temperatur memiliki peran penting dalam teknologi *smart pavement* karena mampu mengukur suhu pada permukaan maupun lapisan dalam perkerasan. Variasi suhu sangat mempengaruhi sifat mekanis material perkerasan, terutama aspal yang sensitif terhadap perubahan temperatur. Pada suhu tinggi, aspal cenderung melunak dan mengalami deformasi permanen seperti rutting, sedangkan pada suhu rendah dapat menjadi rapuh dan mudah retak. Dengan pemasangan sensor temperatur, data real-time dapat diperoleh untuk memahami pengaruh iklim terhadap performa perkerasan serta memprediksi risiko kerusakan akibat perubahan suhu ekstrem.

Data temperatur juga digunakan dalam perencanaan dan desain material adaptif terhadap kondisi iklim. Misalnya, informasi distribusi suhu pada perkerasan membantu insinyur menentukan jenis aspal modifikasi atau campuran beton yang lebih tahan terhadap variasi temperatur. Dalam konteks manajemen jalan modern, integrasi sensor temperatur dengan sistem pemantauan berbasis IoT memungkinkan analisis prediktif, sehingga tindakan pemeliharaan dapat disesuaikan dengan kondisi aktual di lapangan.

c. Sensor Kelembaban

Sensor kelembaban memiliki fungsi penting dalam sistem *smart pavement* karena mampu mengukur kadar air pada permukaan maupun lapisan subgrade perkerasan. Kelembaban berlebih pada struktur perkerasan dapat menurunkan kekakuan lapisan dasar dan meningkatkan risiko kerusakan seperti deformasi permanen, retak, atau stripping pada lapisan aspal. Dengan sensor kelembaban, data real-time dapat diperoleh untuk memantau kondisi air dalam struktur jalan, sehingga potensi kerusakan akibat infiltrasi air dapat diantisipasi lebih awal (Koerner, 2012). Data kelembaban berperan penting dalam perencanaan dan pemeliharaan jalan. Informasi ini memungkinkan insinyur jalan

untuk memprediksi umur layanan perkerasan dan menentukan strategi rehabilitasi yang tepat. Dalam sistem *Pavement Management System* (PMS) modern, sensor kelembaban dapat diintegrasikan dengan teknologi IoT untuk menghasilkan pemantauan berkelanjutan. Integrasi ini meningkatkan efisiensi pengelolaan jalan, mengurangi biaya pemeliharaan, dan memperpanjang umur layanan perkerasan.

d. Sensor Defleksi

Sensor defleksi merupakan komponen penting dalam teknologi *smart pavement* karena berfungsi mengukur perubahan bentuk atau penurunan permukaan jalan akibat beban lalu lintas. Pengukuran defleksi ini memberikan data langsung mengenai respons struktural lapisan perkerasan terhadap tekanan kendaraan. Dengan menggunakan perangkat seperti geophone atau sensor LVDT, data defleksi dapat diambil secara akurat dan real-time, sehingga memberikan gambaran kondisi mekanis jalan. Informasi ini sangat berguna untuk menilai kapasitas struktural dan integritas perkerasan dalam jangka panjang.

Data defleksi menjadi dasar dalam evaluasi performa struktural dan perencanaan pemeliharaan jalan. Informasi ini digunakan dalam metode evaluasi seperti *Structural Number* (SN) atau dalam model desain perkerasan lentur dan kaku. Dengan integrasi sensor defleksi ke dalam sistem *Pavement Management System* (PMS), analisis performa jalan dapat dilakukan secara otomatis dan prediktif. Pendekatan ini meningkatkan efisiensi pemeliharaan, memperpanjang umur layanan perkerasan, dan mengurangi biaya rehabilitasi.

e. Sensor Lalu Lintas

Sensor lalu lintas adalah komponen vital dalam sistem *smart pavement* yang berfungsi mengukur volume kendaraan, kecepatan, serta distribusi beban per sumbu (*axle load*). Data ini diperoleh melalui teknologi seperti inductive loop sensors, piezoelectric sensors, atau *video-based traffic monitoring*. Informasi yang diperoleh memungkinkan analisis lalu lintas secara real-time, sehingga memberikan gambaran akurat mengenai pola penggunaan jalan. Hal ini membantu dalam perencanaan dan pengelolaan infrastruktur jalan secara lebih efektif.

Data dari sensor lalu lintas sangat penting dalam menghitung *Equivalent Single Axle Load* (ESAL), yang merupakan parameter utama dalam desain dan evaluasi perkerasan. ESAL mengukur dampak beban lalu lintas terhadap degradasi jalan selama masa layanan. Dengan integrasi sensor lalu lintas dalam *Pavement Management System* (PMS), data ini dapat langsung digunakan untuk analisis beban, prediksi umur perkerasan, dan perencanaan pemeliharaan. Pendekatan ini meningkatkan efisiensi perawatan jalan dan memperpanjang umur layanan perkerasan.

f. Sensor Lingkungan

Sensor lingkungan merupakan bagian penting dari teknologi *smart pavement* yang berfungsi mengukur parameter cuaca seperti curah hujan, suhu udara, kelembaban udara, dan kondisi atmosfer lainnya. Data ini diperoleh melalui sensor presisi tinggi yang terintegrasi dengan sistem pemantauan jalan. Informasi ini membantu memahami kondisi lingkungan sekitar perkerasan secara real-time, sehingga dapat memberikan wawasan penting terkait dampak cuaca terhadap performa jalan.

Data sensor lingkungan berguna untuk memprediksi efek kondisi cuaca terhadap umur perkerasan. Misalnya, curah hujan yang tinggi dapat meningkatkan kelembaban subgrade, menurunkan modulus elastisitas tanah, dan mempercepat kerusakan struktur perkerasan. Data suhu membantu dalam analisis retak termal pada beton atau deformasi pada aspal. Integrasi sensor lingkungan dalam *Pavement Management System* (PMS) memungkinkan pengambilan keputusan berbasis data untuk pemeliharaan preventif, sehingga memperpanjang umur jalan dan meningkatkan keselamatan pengguna.

### 3. Arsitektur *Smart Pavement*

Arsitektur sistem *smart pavement* meliputi beberapa lapisan utama:

- a. Lapisan Sensor: tertanam di permukaan atau lapisan perkerasan untuk mengukur kondisi struktural dan lingkungan.
- b. Lapisan Komunikasi: mengirim data sensor melalui jaringan IoT (misalnya NB-IoT, LoRaWAN, 5G).

- c. Lapisan Data dan Analisis: server yang mengolah data menggunakan algoritma AI untuk menghasilkan informasi kondisi jalan.
- d. Lapisan Integrasi GIS: menampilkan data dalam format peta untuk analisis spasial dan pengambilan keputusan.
- e. Lapisan Aksi: sistem rekomendasi atau eksekusi perbaikan otomatis berdasarkan data sensor.

#### 4. Aplikasi *Smart Pavement*

*Smart pavement* memiliki berbagai aplikasi di dunia nyata:

##### a. *Condition-Based Maintenance*

*Condition-Based Maintenance* (CBM) pada *smart pavement* memanfaatkan data real-time dari berbagai sensor seperti sensor defleksi, kelembaban, suhu, dan lalu lintas untuk memantau kondisi jalan secara terus-menerus. Dengan informasi ini, pengelola jalan dapat mengetahui kondisi struktural dan permukaan jalan secara akurat tanpa menunggu kerusakan parah terjadi. Pendekatan ini memungkinkan intervensi yang tepat waktu, sehingga pemeliharaan dilakukan hanya ketika diperlukan berdasarkan kondisi aktual, bukan jadwal rutin yang kaku.

Pendekatan CBM memiliki manfaat signifikan dalam efisiensi biaya dan perpanjangan umur jalan. Dengan pemeliharaan yang dilakukan secara tepat waktu, frekuensi rehabilitasi besar dapat dikurangi, menghemat anggaran pengelolaan jalan. Selain itu, CBM meningkatkan keselamatan pengguna jalan karena potensi kerusakan dapat diidentifikasi dan diperbaiki sebelum menimbulkan risiko. Integrasi CBM dalam *Pavement Management System* modern menjadikan pengelolaan infrastruktur jalan lebih proaktif, efisien, dan berkelanjutan.

##### b. Integrasi dengan *Connected Vehicles*

Integrasi *smart pavement* dengan *connected vehicles* merupakan langkah penting menuju ekosistem transportasi cerdas. Melalui teknologi *Vehicle-to-Infrastructure* (V2I), sensor pada *smart pavement* dapat mengirim data kondisi jalan secara real-time ke kendaraan pintar. Informasi seperti keberadaan lubang, genangan air, atau penurunan kualitas permukaan jalan dapat diterima langsung oleh sistem navigasi kendaraan, sehingga pengemudi mendapatkan peringatan dini. Ini memungkinkan pengemudi

mengambil tindakan preventif, meningkatkan keselamatan dan kenyamanan berkendara (Zhou et al., 2025).

Integrasi ini juga memberikan manfaat jangka panjang bagi manajemen jalan. Data yang dikirim dari kendaraan ke sistem pusat dapat digunakan untuk analisis kondisi jaringan jalan secara lebih akurat. Hal ini memungkinkan pengelola jalan melakukan pemeliharaan yang lebih terarah dan efisien. Dengan adanya interaksi dua arah antara infrastruktur dan kendaraan, transportasi menjadi lebih adaptif terhadap kondisi nyata jalan, mendukung mobilitas yang aman, efisien, dan berkelanjutan.

c. Keselamatan Jalan

Penggunaan *smart pavement* untuk keselamatan jalan memanfaatkan data real-time dari berbagai sensor, seperti kelembaban, suhu, dan kondisi permukaan jalan. Informasi ini dapat dianalisis untuk mendeteksi potensi bahaya, seperti genangan air, kondisi licin akibat hujan, atau retakan yang membahayakan. Data tersebut kemudian dikirimkan ke sistem *Intelligent Transportation System* (ITS), yang dapat memberikan peringatan dini kepada pengguna jalan melalui papan informasi elektronik, aplikasi navigasi, atau komunikasi langsung ke kendaraan pintar. Pendekatan ini meningkatkan responsivitas terhadap kondisi jalan yang berubah secara dinamis, sehingga risiko kecelakaan dapat diminimalkan. Selain meningkatkan keselamatan, *smart pavement* juga berperan dalam mengoptimalkan alur lalu lintas dengan menginformasikan kondisi jalan secara akurat kepada pengguna.

d. Optimasi Desain Perkerasan

Optimasi desain perkerasan melalui *smart pavement* memanfaatkan data sensor secara real-time untuk memperbaiki akurasi model desain. Sensor yang mengukur kelembaban, suhu, defleksi, dan beban lalu lintas memberikan informasi aktual mengenai kondisi jalan yang sesungguhnya. Data ini kemudian digunakan untuk mengkalibrasi model prediksi umur perkerasan, sehingga desain baru dapat disesuaikan dengan kondisi nyata lapangan, bukan hanya asumsi teoritis (Koerner, 2012). Pendekatan ini meningkatkan keandalan perencanaan perkerasan dan mengurangi risiko kegagalan struktural.

Optimasi desain ini membantu dalam efisiensi penggunaan material dan biaya konstruksi. Dengan memahami perilaku perkerasan secara aktual, perencanaan dapat dilakukan secara lebih tepat, seperti menentukan ketebalan lapisan atau pemilihan material yang optimal. Strategi ini tidak hanya memperpanjang umur layanan jalan, tetapi juga mendukung prinsip pembangunan berkelanjutan dengan meminimalkan penggunaan sumber daya dan dampak lingkungan.

## C. Perkerasan untuk Kendaraan Listrik dan Otonom

Perkembangan pesat teknologi transportasi di abad ke-21 membawa dua tren utama: kendaraan listrik (*electric vehicles* – EVs) dan kendaraan otonom (*autonomous vehicles* – AVs). Kedua inovasi ini menuntut perubahan signifikan pada desain dan konstruksi perkerasan jalan. Kendaraan listrik membutuhkan infrastruktur jalan yang mendukung efisiensi energi, kenyamanan berkendara, dan durabilitas tinggi untuk menghadapi karakteristik beban yang berbeda. Kendaraan otonom, di sisi lain, membutuhkan permukaan jalan yang memiliki tingkat presisi tinggi dalam hal geometri, kualitas permukaan, dan integrasi sistem sensor. Konsep *smart pavement* menjadi bagian penting dari persiapan infrastruktur untuk era EV dan AV (Zhou et al., 2025).

### 1. Tantangan Perkerasan untuk Kendaraan Listrik

Kendaraan listrik memiliki karakteristik beban dan operasional yang berbeda dibanding kendaraan bermesin pembakaran internal:

a. Beban yang Lebih Berat

Kendaraan listrik (EV) umumnya memiliki bobot lebih besar dibanding kendaraan konvensional akibat adanya paket baterai (*battery packs*) yang berat. Peningkatan beban ini menambah tekanan pada permukaan jalan, sehingga mempengaruhi kinerja perkerasan, terutama pada jalan lentur maupun kaku. Tekanan tambahan ini dapat mempercepat deformasi seperti rutting dan retak, sehingga menuntut penyesuaian dalam desain perkerasan. Desain harus mempertimbangkan ketebalan lapisan yang lebih optimal dan pemilihan material dengan modulus tinggi serta daya tahan yang lebih baik untuk menahan beban ekstra, demi memastikan umur layanan jalan tetap maksimal.

b. Perubahan Pola Lalu Lintas

Dengan berkembangnya EV, pola penggunaan jalan dapat berubah, termasuk:

- 1) Tingginya permintaan rute khusus EV (EV corridors).
- 2) Perubahan distribusi beban di jalan.
- 3) Kebutuhan integrasi titik pengisian daya (*charging stations*) di sepanjang jalan.

c. Efek pada Keausan Perkerasan

Bobot tambahan kendaraan listrik (EV) mempercepat proses keausan perkerasan, terutama pada jenis lentur. Beban yang lebih berat meningkatkan tekanan siklik pada permukaan jalan, mempercepat terjadinya deformasi plastis seperti rutting dan fatigue cracking. Jika desain perkerasan tidak disesuaikan untuk menanggapi peningkatan beban ini, umur layanan jalan dapat menurun signifikan. Oleh karena itu, diperlukan strategi desain ulang yang mencakup peningkatan ketebalan lapisan, penggunaan material berkualitas tinggi, serta teknologi modifikasi aspal atau beton agar perkerasan mampu bertahan terhadap tekanan tambahan dari kendaraan listrik.

## 2. Tantangan Perkerasan untuk Kendaraan Otonom

Kendaraan otonom memerlukan kondisi jalan yang sangat presisi untuk navigasi dan keselamatan. Tantangan perkerasan untuk AV meliputi:

a. Kualitas Permukaan

Kendaraan otonom (AV) sangat bergantung pada sensor canggih seperti kamera, lidar, dan radar untuk navigasi dan keselamatan. Sensor ini memerlukan kondisi permukaan jalan yang seragam dan bebas dari gangguan seperti lubang, retakan, atau ketidakrataan, karena ketidak sempurnaan tersebut dapat mengganggu akurasi deteksi dan interpretasi data. Oleh karena itu, kualitas permukaan jalan menjadi faktor krusial dalam mendukung operasi kendaraan otonom. Hal ini menuntut standar perkerasan yang lebih tinggi dan pemeliharaan jalan yang lebih konsisten, sehingga memungkinkan AV beroperasi secara optimal dengan tingkat keselamatan dan efisiensi yang maksimal.

b. Marking Jalan yang Presisi

Marka jalan berperan penting bagi kendaraan otonom (AV) karena sistem penginderaan seperti kamera dan lidar bergantung pada garis dan tanda tersebut untuk navigasi yang akurat. Agar efektif, marking jalan harus tahan lama, memiliki kontras tinggi, dan tetap terlihat dalam berbagai kondisi cuaca seperti hujan, kabut, atau cahaya redup. Perkerasan perlu dirancang dan dipelihara sedemikian rupa sehingga permukaan tidak cepat aus atau berubah warna akibat lalu lintas berat, sehingga marka tetap jelas terbaca oleh sensor AV. Standar kualitas perkerasan ini menjadi aspek penting dalam mendukung operasi kendaraan otonom secara aman dan optimal.

c. Integrasi Infrastruktur Cerdas

Integrasi infrastruktur cerdas menjadi tantangan penting untuk kendaraan otonom (AV) karena AV memerlukan data kondisi jalan secara real-time untuk navigasi yang aman dan efisien. *Smart pavement* harus dirancang untuk menampung sensor embedded yang memantau deformasi, kelembaban, suhu, dan kerusakan permukaan, serta sistem komunikasi untuk mengirimkan data ke kendaraan. Selain itu, perkerasan harus mampu mendukung jaringan energi, seperti sistem pengisian daya nirkabel untuk EV. Hal ini menuntut inovasi dalam desain material perkerasan agar tetap kuat, tahan lama, dan kompatibel dengan teknologi pintar tanpa mengorbankan fungsi struktural dan keselamatan jalan.

### 3. Konsep Perkerasan Adaptif untuk EV dan AV

Perkerasan untuk kendaraan listrik dan otonom harus memenuhi beberapa konsep desain adaptif:

- a. Durabilitas Tinggi: Material perkerasan harus tahan terhadap beban berat dan keausan yang lebih tinggi akibat kendaraan listrik, serta mempertahankan kualitas permukaan untuk mendukung navigasi AV.
- b. Integrasi Sistem Sensor: Perkerasan AV harus dirancang dengan lapisan yang memungkinkan integrasi sensor untuk monitoring kondisi jalan, interaksi dengan kendaraan, dan komunikasi data (*vehicle-to-infrastructure – V2I*).

- c. Efisiensi Energi: Perkerasan EV harus mendukung efisiensi energi kendaraan, misalnya dengan penggunaan material yang mengurangi rolling resistance (*low rolling resistance pavements* – LRR pavements), sehingga meningkatkan jarak tempuh baterai EV.

#### 4. Material dan Teknologi Perkerasan untuk EV dan AV

- a. *Low Rolling Resistance Pavement* (LRRP)

LRRP adalah perkerasan yang dirancang untuk mengurangi energi yang hilang akibat gesekan antara ban dan permukaan jalan. Keunggulan LRRP:

- 1) Mengurangi konsumsi energi kendaraan.
- 2) Mengurangi emisi karbon.
- 3) Memperpanjang umur baterai EV.

- b. *High-Precision Asphalt* dan Beton

*High-Precision Asphalt* dan Beton menjadi kebutuhan penting bagi kendaraan otonom (AV) karena kualitas permukaan jalan secara langsung mempengaruhi akurasi sensor seperti kamera, lidar, dan radar. Permukaan harus memiliki toleransi ketidakteraturan yang sangat rendah (smoothness tinggi) agar marka jalan dan detail geometris dapat terdeteksi dengan tepat. Selain itu, material ini harus tahan terhadap beban lalu lintas tinggi dan kondisi cuaca ekstrem untuk menjaga konsistensi performa dalam jangka panjang. Penerapan teknologi ini memastikan AV dapat beroperasi secara aman dan efisien, sekaligus meningkatkan kenyamanan pengguna dan memperpanjang umur perkerasan jalan.

- c. Sensor Embedded Pavement

Sensor Embedded Pavement adalah inovasi teknologi perkerasan cerdas yang menanamkan berbagai sensor langsung ke dalam lapisan jalan. Sensor ini mampu mengukur kondisi lalu lintas, suhu permukaan, kelembaban, serta deformasi perkerasan secara real time. Data yang dihasilkan kemudian dikirimkan ke sistem kendaraan otonom (AV) untuk mendukung navigasi, pengambilan keputusan, dan peningkatan keselamatan berkendara. Teknologi ini memungkinkan AV merespons perubahan kondisi jalan secara cepat dan akurat, sekaligus mendukung manajemen jalan yang lebih efisien. Penerapan

sensor embedded pavement menjadi langkah penting menuju infrastruktur transportasi masa depan.

d. Material Konduktif

Material konduktif untuk perkerasan merupakan inovasi mutakhir yang dirancang untuk mendukung transfer energi secara wireless kepada kendaraan listrik (EV) melalui konsep dynamic wireless charging pavement. Material ini mengandung komponen konduktif khusus yang memungkinkan arus listrik ditransmisikan langsung dari permukaan jalan ke sistem penerima pada EV saat kendaraan melaju. Teknologi ini berpotensi mengurangi kebutuhan pengisian baterai secara stasioner, memperpanjang jarak tempuh, dan meningkatkan efisiensi transportasi listrik. Implementasinya membutuhkan penelitian mendalam terkait keamanan, efisiensi energi, dan daya tahan material terhadap beban lalu lintas.

## 5. Integrasi Infrastruktur EV dan AV

a. *Smart Road Infrastructure*

Infrastruktur jalan untuk EV dan AV harus terintegrasi dengan sistem ITS (*Intelligent Transportation System*) yang mencakup:

- 1) Data real time kondisi jalan.
- 2) Informasi lalu lintas.
- 3) Status titik pengisian daya EV.

b. *Dynamic Wireless Charging*

*Dynamic wireless charging* adalah teknologi inovatif yang memanfaatkan prinsip electromagnetic induction untuk mengisi baterai kendaraan listrik (EV) saat melintas di atas permukaan jalan. Sistem ini membutuhkan perkerasan khusus yang dilengkapi dengan konduktor terintegrasi dan perangkat pengelolaan energi untuk mentransfer daya secara efisien. Teknologi ini memungkinkan pengisian baterai tanpa menghentikan kendaraan, sehingga meningkatkan kenyamanan dan memperpanjang jarak tempuh EV. Implementasi dynamic wireless charging memerlukan koordinasi antara desain perkerasan, infrastruktur energi, dan standar keselamatan, serta evaluasi biaya untuk memastikan kelayakan dan efektivitas teknologi pada skala luas.

c. *Vehicle-to-Infrastructure* (V2I) Communication

*Vehicle-to-Infrastructure* (V2I) communication adalah elemen kunci dalam pengembangan *smart pavement* untuk kendaraan otonom (AV), memungkinkan pertukaran data real-time antara kendaraan dan infrastruktur jalan. Melalui sistem ini, AV dapat menerima informasi kondisi jalan, marka, hambatan, atau kondisi cuaca langsung dari jaringan perkerasan pintar. Implementasi V2I memerlukan integrasi sensor embedded pada perkerasan dan jaringan komunikasi berkecepatan tinggi seperti 5G untuk memastikan latensi rendah dan keandalan data. Teknologi ini meningkatkan keselamatan, efisiensi lalu lintas, dan kemampuan navigasi AV, sehingga menjadi bagian penting dalam ekosistem transportasi masa depan.

#### D. Daur Ulang Material Jalan (Recycling)

Pada beberapa dekade terakhir, pembangunan infrastruktur jalan secara global mengalami peningkatan pesat. Namun, pertumbuhan ini membawa tantangan besar terkait ketersediaan material, biaya konstruksi, serta dampak lingkungan. Oleh karena itu, konsep daur ulang material jalan (*road recycling*) menjadi sangat penting sebagai bagian dari pembangunan infrastruktur berkelanjutan (Rathore et al., 2019). Daur ulang material jalan berarti memanfaatkan kembali material perkerasan yang sudah digunakan baik itu aspal lama, beton, maupun agregat untuk konstruksi atau rehabilitasi jalan baru. Proses ini tidak hanya mengurangi penggunaan material baru, tetapi juga menurunkan biaya, mengurangi emisi karbon, dan mengurangi limbah konstruksi.

Daur ulang material jalan adalah proses pengolahan kembali material perkerasan yang sudah ada menjadi material yang dapat digunakan kembali untuk pembangunan atau perbaikan jalan. Metode daur ulang dapat dilakukan secara *in situ* (di lokasi) atau *ex situ* (di lokasi terpisah). Daur ulang material jalan sejalan dengan konsep ekonomi sirkular (*circular economy*), di mana material dimanfaatkan kembali secara berkelanjutan sehingga mengurangi limbah dan menjaga sumber daya alam.

## 1. Jenis Daur Ulang Material Jalan

Ada berbagai metode daur ulang material perkerasan jalan, masing-masing memiliki karakteristik dan aplikasi tertentu:

a. *Hot In-Place Recycling (HIR)*

Proses daur ulang material perkerasan aspal dengan pemanasan di lokasi, penggilingan material lama, pencampuran kembali dengan bahan pengikat, dan penempatan ulang. Keunggulan:

- 1) Mengurangi kebutuhan transportasi material.
- 2) Efisien untuk perbaikan permukaan jalan.
- 3) Mengurangi penggunaan bahan baru.

b. *Cold In-Place Recycling (CIR)*

Penggilingan material perkerasan lama tanpa pemanasan, pencampuran dengan bahan pengikat dingin seperti emulsified asphalt atau foam asphalt, dan penempatan kembali. Keunggulan:

- 1) Lebih hemat energi dibanding HIR.
- 2) Lebih ramah lingkungan.
- 3) Cocok untuk rehabilitasi jalan berlapis tipis.

c. *Full Depth Reclamation (FDR)*

Metode daur ulang dengan menggiling seluruh lapisan perkerasan dan subgrade, kemudian mencampur dengan bahan pengikat untuk membuat struktur jalan baru. Keunggulan:

- 1) Menghasilkan struktur perkerasan baru dengan kualitas tinggi.
- 2) Mengurangi kebutuhan agregat baru secara signifikan.

d. *Reclaimed Asphalt Pavement (RAP)*

Penggunaan kembali material aspal dari jalan lama yang telah digiling (*milling*), dicampur dengan aspal baru untuk membentuk lapisan baru. Keunggulan:

- 1) Mengurangi penggunaan aspal baru.
- 2) Mengurangi emisi karbon dari produksi aspal.

e. *Recycling Beton (Recycled Concrete Aggregate – RCA)*

Penggunaan kembali agregat beton dari konstruksi jalan lama untuk lapisan subbase atau base pada jalan baru. Keunggulan:

- 1) Mengurangi penggunaan agregat alam.
- 2) Menurunkan biaya konstruksi.

## 2. Teknologi dan Proses Daur Ulang

### a. Teknologi Penggilingan

Teknologi penggilingan merupakan salah satu proses penting dalam daur ulang perkerasan jalan. Metode ini menggunakan peralatan seperti cold milling machines atau *hot recycling plants* untuk menghancurkan lapisan perkerasan lama menjadi material yang dapat dimanfaatkan kembali. *Cold milling machines* bekerja pada suhu rendah, sehingga mengurangi emisi gas dan konsumsi energi, sementara *hot recycling plants* memanfaatkan panas untuk mengolah material aspal lama sehingga sifatnya kembali seperti aspal baru (Turk et al., 2016).

Penggilingan modern dirancang untuk menghasilkan material dengan ukuran butir yang seragam dan kadar bahan aspal yang sesuai, sehingga memudahkan proses pencampuran ulang dengan aspal baru. Teknologi ini tidak hanya meningkatkan efisiensi daur ulang, tetapi juga mengurangi kebutuhan bahan baku baru dan dampak lingkungan. Implementasi penggilingan presisi mendukung pembangunan infrastruktur jalan yang lebih berkelanjutan, hemat biaya, dan ramah lingkungan.

### b. Pemisahan Material

Pemisahan material merupakan tahap krusial dalam proses daur ulang perkerasan jalan. Setelah proses penggilingan, material yang dihasilkan masih mengandung kontaminan seperti debu, bahan organik, atau partikel logam yang dapat menurunkan kualitas material daur ulang. Untuk itu, sistem penyaringan otomatis digunakan untuk memisahkan kontaminan tersebut. Teknologi penyaringan modern memanfaatkan getaran, udara bertekanan, dan mekanisme geser untuk menyaring material berdasarkan ukuran dan jenisnya.

Proses pemisahan yang efektif memastikan bahwa material hasil daur ulang memiliki kualitas yang memenuhi standar konstruksi. Material bersih ini kemudian dapat dicampur kembali dengan aspal baru atau digunakan pada lapisan subbase dan base perkerasan. Dengan demikian, teknologi pemisahan material tidak hanya meningkatkan kualitas hasil daur ulang tetapi juga mendukung efisiensi biaya dan keberlanjutan pembangunan jalan.

c. Penambahan Bahan Pengikat

Penambahan bahan pengikat merupakan tahap penting dalam proses daur ulang perkerasan untuk meningkatkan kualitas dan daya tahan material. Material hasil penggilingan biasanya memiliki sifat mekanik yang berkurang akibat penggunaan sebelumnya. Oleh karena itu, pencampuran dengan bahan pengikat seperti aspal emulsi, foamed asphalt, atau semen menjadi solusi efektif untuk memperbaiki kohesi dan kestabilan campuran. Bahan pengikat ini membantu mengikat partikel material daur ulang sehingga menghasilkan lapisan perkerasan yang lebih kuat dan tahan lama.

Penggunaan bahan pengikat juga berpengaruh pada umur layanan perkerasan. Aspal emulsi dan foamed asphalt memberikan fleksibilitas dan daya tahan terhadap deformasi, sedangkan semen meningkatkan kekakuan dan stabilitas struktural. Proses ini tidak hanya memperpanjang umur perkerasan tetapi juga mendukung prinsip pembangunan berkelanjutan dengan memanfaatkan material bekas. Dengan teknik ini, biaya konstruksi dapat ditekan sekaligus mengurangi dampak lingkungan.

d. Pengujian Kualitas

Pengujian kualitas merupakan tahap krusial dalam proses daur ulang perkerasan untuk memastikan bahwa material hasil daur ulang memenuhi standar teknis dan memiliki performa yang optimal. Beberapa metode pengujian umum digunakan, seperti Marshall Stability, yang mengukur stabilitas dan kekuatan campuran aspal; Indirect Tensile Strength, yang menilai ketahanan material terhadap retak tarik; serta Dynamic Modulus, yang mengukur kekakuan material pada berbagai kondisi beban dan suhu. Pengujian ini memberikan data teknis yang menjadi dasar untuk menentukan apakah material layak digunakan pada perkerasan baru atau perlu penyesuaian campuran.

Pengujian kualitas juga berperan dalam memastikan keamanan dan kenyamanan pengguna jalan. Hasil pengujian membantu perencana jalan menentukan jenis pengikat, proporsi material, dan teknik pengolahan yang tepat. Dengan demikian, pengujian ini tidak hanya menjaga kualitas struktural perkerasan tetapi juga

mendukung keberlanjutan infrastruktur jalan dengan memanfaatkan material daur ulang secara efektif dan aman.

### 3. Tantangan dalam Daur Ulang Material Jalan

Meskipun memiliki banyak keuntungan, daur ulang material jalan menghadapi tantangan signifikan:

a. Kualitas Material

Kualitas material daur ulang sangat dipengaruhi oleh kondisi material lama yang digiling, proses pengolahan yang digunakan, serta kualitas bahan pengikat baru yang ditambahkan. Material lama yang mengandung kontaminan atau telah mengalami degradasi signifikan akan menghasilkan campuran yang kurang optimal jika tidak diproses dengan teknologi tepat. Teknologi pengolahan modern seperti *cold milling* atau *hot recycling* mampu meningkatkan kualitas material, tetapi efektivitasnya tetap bergantung pada kualitas input awal. Selain itu, pemilihan bahan pengikat baru yang sesuai sangat penting untuk memastikan kekuatan, daya tahan, dan umur layanan perkerasan hasil daur ulang tetap memenuhi standar teknis yang berlaku.

b. Standarisasi Proses

Ketiadaan standar nasional maupun internasional yang seragam dalam proses daur ulang material jalan menjadi salah satu hambatan signifikan dalam penerapan teknologi ini secara luas. Perbedaan metode pengolahan, kualitas material, dan kriteria teknis antara daerah atau negara membuat hasil daur ulang tidak selalu konsisten. Hal ini menimbulkan keraguan dalam keandalan dan keamanan penggunaan material daur ulang pada perkerasan jalan. Standarisasi proses, mulai dari teknik penggilingan, pemisahan material, hingga penggunaan bahan pengikat, diperlukan untuk memastikan kualitas, efisiensi, dan keberlanjutan teknologi daur ulang, sekaligus mendorong adopsi yang lebih luas dalam industri jalan.

c. Keterbatasan Teknologi

Keterbatasan teknologi menjadi tantangan utama dalam penerapan daur ulang material jalan secara luas. Beberapa metode daur ulang memerlukan investasi awal yang besar untuk mesin khusus seperti *cold milling machines*, *hot recycling plants*, dan sistem penyaringan otomatis. Selain itu, tenaga kerja terlatih

diperlukan untuk mengoperasikan dan memelihara peralatan tersebut, sehingga meningkatkan biaya operasional. Keterbatasan ini sering kali menjadi hambatan bagi pemerintah daerah atau kontraktor kecil untuk mengadopsi teknologi daur ulang. Oleh karena itu, pengembangan teknologi yang lebih efisien dan terjangkau sangat penting untuk memperluas implementasi daur ulang material jalan secara berkelanjutan.

d. Faktor Lingkungan

Proses daur ulang material jalan, meskipun berkontribusi pada pengurangan limbah dan pemanfaatan kembali material, masih menghadapi tantangan dari segi dampak lingkungan. Metode *hot recycling*, misalnya, menghasilkan emisi gas rumah kaca dan polutan udara akibat pemanasan material lama. Selain itu, penggunaan energi untuk pengolahan material juga berkontribusi pada jejak karbon. Oleh sebab itu, pengembangan teknologi daur ulang yang lebih ramah lingkungan menjadi penting, seperti *cold recycling* atau penggunaan bahan pengikat berkelanjutan. Inovasi ini tidak hanya mendukung kelestarian lingkungan tetapi juga meningkatkan penerimaan dan implementasi metode daur ulang di skala yang lebih luas.

## E. Perkerasan Modular dan Prefabrikasi

Perkerasan modular dan prefabrikasi merupakan inovasi signifikan dalam konstruksi jalan yang bertujuan mempercepat proses pembangunan, mengurangi biaya, meningkatkan kualitas, dan meminimalkan gangguan lalu lintas (Vaitkus et al., 2019). Konsep ini mengadaptasi metode konstruksi modern yang telah sukses di sektor bangunan dan jembatan, untuk diterapkan pada sektor perkerasan jalan. Dengan meningkatnya kebutuhan infrastruktur yang cepat dan efisien, serta tekanan untuk mengurangi dampak lingkungan, perkerasan modular dan prefabrikasi menawarkan solusi yang menjanjikan bagi masa depan teknologi perkerasan jalan.

Perkerasan modular adalah sistem konstruksi jalan yang menggunakan elemen perkerasan siap pasang (*precast pavement elements*) yang dirakit di lokasi konstruksi. Elemen ini dibuat secara prefabrikasi di pabrik atau fasilitas produksi, kemudian dipasang di lapangan seperti modul puzzle. Prinsip utama perkerasan modular adalah

produksi di luar lokasi konstruksi untuk memastikan kualitas, kemudian pemasangan di lokasi secara cepat. Pendekatan ini mengurangi waktu konstruksi dan ketergantungan pada kondisi cuaca.

## 1. Jenis-jenis Perkerasan Modular dan Prefabrikasi

Beberapa jenis sistem modular dan prefabrikasi yang berkembang di industri jalan meliputi:

a. Perkerasan Beton Modular

Perkerasan beton modular memanfaatkan panel beton pra-cetak yang diproduksi di pabrik dengan standar kontrol kualitas yang ketat, sehingga menghasilkan produk yang presisi dan tahan lama. Panel ini dirancang untuk langsung dipasang di lokasi konstruksi, mengurangi waktu pengerjaan dan gangguan lalu lintas. Sistem ini banyak digunakan pada jalan tol, bandara, dan jalan utama yang memerlukan ketahanan tinggi terhadap beban lalu lintas berat serta durabilitas jangka panjang. Keunggulan perkerasan beton modular termasuk kecepatan konstruksi, pengurangan biaya pemeliharaan, dan kemampuan mengganti panel rusak secara cepat tanpa membongkar seluruh struktur jalan.

b. Perkerasan Aspal Modular

Perkerasan aspal modular menggunakan blok aspal yang diproduksi secara prefabrikasi di pabrik dengan kontrol kualitas yang baik, lalu disusun di lokasi konstruksi sesuai desain jalan. Metode ini menawarkan fleksibilitas tinggi karena blok dapat dipasang ulang atau diganti dengan cepat jika mengalami kerusakan, sehingga mempercepat proses perbaikan dan mengurangi gangguan lalu lintas. Selain itu, pemasangan perkerasan aspal modular relatif lebih sederhana dibandingkan konstruksi konvensional. Sistem ini cocok digunakan pada area dengan kebutuhan perbaikan cepat, seperti jalan perkotaan, jalan bandara, atau area parkir, serta mendukung efisiensi biaya dan keberlanjutan infrastruktur jalan (Hu et al., 2019).

c. Perkerasan Komposit Modular

Perkerasan komposit modular merupakan inovasi yang menggabungkan beton dengan material polimer atau geosintetik untuk menghasilkan elemen perkerasan prefabrikasi dengan sifat mekanik unggul dan daya tahan tinggi. Kombinasi material ini

meningkatkan kekuatan struktural, ketahanan terhadap retak, deformasi, serta memperpanjang umur layanan perkerasan. Keunggulan lain termasuk pemasangan yang cepat dan efisiensi pemeliharaan, karena modul dapat diganti secara selektif tanpa mengganggu keseluruhan struktur jalan. Sistem ini cocok untuk proyek infrastruktur dengan beban lalu lintas tinggi dan kondisi lingkungan ekstrem, seperti jalan tol, bandara, dan pelabuhan.

d. Sistem Interlocking Pavement

Sistem interlocking pavement menggunakan elemen perkerasan berbentuk khusus yang saling mengunci satu sama lain, sehingga memudahkan proses pemasangan dan meningkatkan stabilitas struktur perkerasan. Desain interlocking ini memungkinkan distribusi beban yang lebih merata, mengurangi deformasi, serta meningkatkan ketahanan terhadap pergeseran dan retak. Keunggulan lain termasuk kemudahan perbaikan, karena elemen yang rusak dapat diganti tanpa merusak bagian lain. Sistem ini sangat cocok digunakan pada area dengan lalu lintas padat atau permukaan yang memerlukan estetika tinggi, seperti trotoar, area parkir, dan jalan perkotaan.

## 2. Teknologi dan Metode Produksi

a. Pabrikasi Panel Beton

Pabrikasi panel beton dilakukan dengan menggunakan cetakan presisi tinggi yang dirancang untuk menghasilkan dimensi yang konsisten sesuai standar teknik. Proses ini memastikan bahwa setiap panel beton memiliki ukuran yang tepat, toleransi yang minim, dan permukaan yang rata sehingga memudahkan pemasangan di lapangan. Keunggulan metode ini adalah mempercepat proses konstruksi karena panel sudah siap pasang ketika tiba di lokasi proyek.

Curing beton dilakukan secara terkontrol dalam fasilitas pabrik, yang meliputi pengaturan suhu, kelembaban, dan waktu pengerasan beton. Curing terkontrol meningkatkan kekuatan, daya tahan, dan ketahanan panel terhadap retak dan deformasi akibat beban lalu lintas atau perubahan iklim. Metode pabrikasi ini juga memungkinkan penggunaan material campuran khusus seperti beton berkinerja tinggi (HPC) dan beton ramah

lingkungan, sehingga menghasilkan perkerasan modular yang efisien, kuat, dan lebih ramah lingkungan.

b. Produksi Blok Aspal

Produksi blok aspal dilakukan dengan menggunakan mesin produksi aspal modular yang dirancang khusus untuk menghasilkan material dengan kualitas konsisten dan presisi tinggi. Mesin ini mampu memproses campuran aspal dengan formulasi tertentu, termasuk penggunaan modifikasi polimer atau bahan aditif lain, sehingga menghasilkan blok aspal yang memiliki sifat mekanik unggul. Keunggulan metode ini adalah kemampuan menghasilkan blok aspal dengan dimensi seragam dan daya tahan yang tinggi terhadap beban lalu lintas serta perubahan suhu.

Proses produksi blok aspal modular dilakukan dalam kondisi terkontrol untuk memastikan kualitas setiap blok memenuhi standar teknis. Teknologi ini memungkinkan produksi massal dengan efisiensi tinggi, sehingga waktu konstruksi di lapangan dapat dipersingkat. Blok aspal modular ini juga memiliki fleksibilitas pemasangan dan perbaikan yang lebih mudah, serta potensi penggunaan material daur ulang, sehingga mendukung praktik konstruksi berkelanjutan.

c. Integrasi Sensor

Integrasi sensor pada panel modular merupakan inovasi penting dalam pengembangan konsep *smart pavement*. Panel modular yang dilengkapi sensor dapat memantau kondisi perkerasan secara real-time, termasuk kelembaban, suhu, dan tekanan yang bekerja pada struktur jalan. Data yang diperoleh dari sensor ini dapat digunakan untuk mengevaluasi performa perkerasan, mendeteksi kerusakan sejak dini, dan memberikan informasi penting bagi pengelola jalan untuk mengambil tindakan pemeliharaan secara proaktif.

Proses integrasi sensor dilakukan pada tahap pabrikasi panel modular, sehingga sensor tertanam secara aman dan terlindungi dari kerusakan mekanis atau lingkungan. Teknologi ini memungkinkan pengelolaan jaringan jalan yang lebih efisien dengan memanfaatkan data real-time untuk analisis kondisi jalan, prediksi umur layanan, serta optimasi desain perkerasan berikutnya. Selain meningkatkan keamanan dan kenyamanan

pengguna jalan, sistem ini juga mendukung konsep predictive maintenance, yang mengurangi biaya pemeliharaan jangka panjang dan memperpanjang umur perkerasan.

d. Sistem Interlocking

Sistem interlocking adalah metode inovatif dalam produksi perkerasan modular yang memanfaatkan bentuk elemen khusus sehingga dapat saling mengunci tanpa membutuhkan perekat tambahan. Desain ini memungkinkan pemasangan panel atau blok perkerasan dilakukan dengan cepat dan presisi, sehingga mempercepat proses konstruksi. Keunggulan sistem ini terletak pada kemudahan pemasangan dan pembongkaran, yang sangat berguna untuk perbaikan lokal tanpa harus menghancurkan area yang luas. Selain itu, sistem ini memberikan stabilitas mekanik yang tinggi karena beban dapat didistribusikan secara merata antar elemen.

Proses produksi elemen interlocking memerlukan cetakan presisi tinggi untuk memastikan kecocokan dimensi antar blok. Selain itu, bahan yang digunakan harus memiliki kekuatan mekanik yang memadai agar elemen mampu menahan beban lalu lintas. Sistem ini tidak hanya menghemat waktu konstruksi, tetapi juga mengurangi biaya pemeliharaan jangka panjang karena perbaikan dapat dilakukan secara selektif. Inovasi ini mendukung konsep perkerasan yang efisien, fleksibel, dan ramah lingkungan.

### 3. Aplikasi Perkerasan Modular dan Prefabrikasi

a. Jalan Tol

Penggunaan panel beton modular pada jalan tol merupakan solusi inovatif untuk mempercepat konstruksi dan rehabilitasi jalan tanpa mengganggu arus lalu lintas secara signifikan. Metode ini memungkinkan pemasangan panel beton yang telah diproduksi sebelumnya di pabrik dengan kontrol kualitas tinggi, sehingga proses di lapangan menjadi lebih cepat dan efisien. Pemasangan modular juga memungkinkan segmen jalan yang rusak diperbaiki secara selektif tanpa perlu menutup seluruh jalur, sehingga mengurangi waktu penutupan jalan dan dampak pada mobilitas pengguna jalan.

Penggunaan perkerasan modular pada jalan tol juga meningkatkan keselamatan kerja dan kualitas konstruksi. Panel

beton yang diproduksi dalam kondisi terkontrol memiliki kekuatan dan toleransi dimensi yang lebih baik, sehingga daya tahan perkerasan meningkat. Dengan sistem ini, pengelola jalan tol dapat menekan biaya pemeliharaan jangka panjang dan memperpanjang umur layanan jalan, sambil menjaga kelancaran lalu lintas secara optimal.

b. Bandara

Runway bandara memerlukan perkerasan yang mampu menahan beban sangat tinggi dari pesawat serta beban dinamis saat pendaratan dan lepas landas. Sistem panel beton modular menjadi pilihan strategis karena menawarkan kekuatan struktural tinggi dan presisi dimensi yang dibutuhkan. Panel-panel ini diproduksi dengan kontrol kualitas ketat di pabrik, sehingga memiliki ketahanan terhadap deformasi dan retak akibat beban berat serta perubahan suhu ekstrem. Penggunaan perkerasan modular memastikan runway dapat memenuhi standar keselamatan penerbangan internasional.

Keunggulan lain dari sistem modular adalah kemudahan dalam pemeliharaan dan perbaikan runway. Panel beton yang rusak dapat diganti secara selektif tanpa harus menutup seluruh permukaan runway, sehingga mengurangi gangguan operasional bandara. Hal ini sangat penting untuk bandara sibuk dengan jadwal penerbangan padat. Dengan pendekatan ini, efektivitas operasional bandara meningkat, biaya pemeliharaan berkurang, dan umur layanan runway menjadi lebih panjang.

c. Jalan Kota

Pada jalan perkotaan, penggunaan perkerasan modular memberikan solusi efisien untuk mengatasi keterbatasan waktu dan gangguan lalu lintas selama konstruksi atau perbaikan. Area seperti jalan raya utama, persimpangan, dan jalur sepeda memerlukan pengerjaan cepat agar aktivitas kota tetap berjalan lancar. Perkerasan modular memungkinkan pemasangan panel atau blok secara cepat tanpa proses curing panjang seperti pada beton konvensional, sehingga waktu penutupan jalan dapat diminimalkan.

Modular pavement juga menawarkan kemudahan dalam perawatan. Panel atau blok yang rusak dapat diganti secara selektif tanpa merusak seluruh struktur jalan. Hal ini sangat

menguntungkan pada jalan perkotaan dengan lalu lintas padat, di mana gangguan harus diminimalkan. Selain itu, modular pavement dapat dirancang dengan variasi tekstur dan warna untuk meningkatkan estetika jalan dan keselamatan pengguna, seperti pada jalur sepeda atau pedestrian zone, sehingga mendukung kenyamanan dan fungsi kota yang modern.

d. Infrastruktur Darurat

Pada situasi darurat seperti bencana alam, kerusakan infrastruktur jalan sering terjadi dan dapat menghambat evakuasi serta distribusi bantuan. Modular pavement menjadi solusi ideal karena kemudahan dan kecepatan pemasangannya. Panel atau blok perkerasan prefabrikasi dapat diproduksi sebelumnya dan segera dikirim ke lokasi bencana untuk pemasangan cepat, sehingga akses transportasi dapat dipulihkan dalam waktu singkat (Hossain et al., 2022).

Modular pavement juga memberikan fleksibilitas dalam kondisi darurat. Sistem ini memungkinkan perbaikan selektif pada segmen jalan yang rusak tanpa perlu membongkar seluruh permukaan. Dengan desain interlocking atau sistem panel yang mudah dilepas, proses perbaikan menjadi efisien dan minim gangguan pada kegiatan darurat lainnya. Teknologi ini juga mendukung penggunaan material ringan dan transportasi modular yang praktis, sehingga sangat cocok untuk respons cepat terhadap bencana dan pemulihan infrastruktur kritis di daerah terdampak.



# BAB XI

## KESIMPULAN

---

---

Buku referensi “Perkerasan Jalan Raya: Teori, Desain, dan Aplikasi” membahas secara komprehensif seluruh aspek perkerasan jalan, mulai dari teori dasar, klasifikasi, material, desain, konstruksi, hingga pemeliharaan dan inovasi teknologi masa depan. Pendekatan ini memberikan pemahaman menyeluruh bagi mahasiswa, akademisi, dan praktisi teknik sipil untuk memahami hubungan antara konsep ilmiah dan penerapannya di lapangan secara utuh dan terintegrasi. Bab I hingga Bab III membahas dasar-dasar perkerasan jalan, meliputi fungsi dan struktur jalan, teori beban dan respons perkerasan, serta jenis-jenis perkerasan seperti lentur, kaku, dan komposit. Bab-bab ini menegaskan pentingnya desain yang tepat agar jalan memiliki ketahanan terhadap beban lalu lintas dan kondisi lingkungan, sekaligus menekankan peran klasifikasi dan fungsi jalan dalam perencanaan infrastruktur.

Bab IV dan Bab V membahas material dan metode desain perkerasan. Pembahasan mencakup tanah dasar, agregat, aspal, beton, serta material inovatif seperti geosintetik dan material daur ulang. Di sisi lain, metode perancangan perkerasan lentur menggunakan AASHTO 1993 dan MDPJ Indonesia diuraikan sebagai pedoman utama, dengan fokus pada perhitungan tebal lapisan dan evaluasi kinerja yang efisien serta berkelanjutan. Bab VI dan Bab VII membahas desain perkerasan kaku, tahapan konstruksi, serta standar teknis yang berlaku. Penjelasan mengenai jenis slab beton, desain sendi dan dowel, serta pengendalian retak menekankan pentingnya pengawasan mutu dan penerapan teknik konstruksi yang tepat. Kualitas hasil akhir perkerasan sangat bergantung pada konsistensi antara perencanaan, pelaksanaan, dan pengendalian mutu di lapangan.

Bab VIII dan Bab IX membahas pemeliharaan, rehabilitasi, dan evaluasi kondisi perkerasan. Ditekankan pentingnya strategi pemeliharaan rutin dan berkala, penerapan teknologi overlay, serta

penggunaan sistem manajemen perkerasan berbasis data digital dan sensor pintar. Integrasi teknologi GIS dan IoT memungkinkan pemantauan kondisi jalan secara real-time untuk meningkatkan efektivitas dan efisiensi pengelolaan infrastruktur jalan. Bab X membahas inovasi masa depan seperti *green pavement*, *smart pavement*, perkerasan untuk kendaraan listrik dan otonom, serta teknologi daur ulang dan modular. Keseluruhan isi buku menegaskan bahwa pembangunan dan pengelolaan jalan harus berorientasi pada keberlanjutan, efisiensi, serta adaptasi terhadap perkembangan teknologi. Dengan demikian, buku ini menjadi referensi penting bagi upaya mewujudkan sistem perkerasan jalan yang tangguh, cerdas, dan ramah lingkungan bagi pembangunan infrastruktur masa depan.

# DAFTAR PUSTAKA

---

- Abuhav, I. (2021). *ISO 9001: 2015 - A Complete Guide to Quality Management Systems*. Taylor & Francis Limited (Sales). <https://books.google.co.id/books?id=abqzzgEACAAJ>
- Al-Jumaili, M. A. H. (2016). Laboratory evaluation of modified porous asphalt mixtures. *Appl. Res. J.*, 8, 2–3.
- Alfallah, A., Offenbacker, D., Ali, A., Mehta, Y., Elshaer, M., & Decarlo, C. (2021). Evaluating the impact of fiber type and dosage rate on laboratory performance of Fiber-Reinforced asphalt mixtures. *Construction and Building Materials*, 310, 125217.
- Anthonissen, J., & Braet, J. (2016). Review and environmental impact assessment of green technologies for base courses in bituminous pavements. *Environmental Impact Assessment Review*, 60, 139–147.
- Arshad, M., & Ahmed, M. F. (2017). Potential use of reclaimed asphalt pavement and recycled concrete aggregate in base/subbase layers of flexible pavements. *Construction and Building Materials*, 151, 83–97.
- Assogba, O. C., Tan, Y., Sun, Z., Lushinga, N., & Bin, Z. (2021). Effect of vehicle speed and overload on dynamic response of semi-rigid base asphalt pavement. *Road Materials and Pavement Design*, 22(3), 572–602.
- Atmanegara, R. F. (2017). *Pengaruh Beban Berlebih Kendaraan Terhadap Umur Rencana Jalan Pada Perkerasan Lentur: Studi Kasus Ruas Jalan Yogyakarta-Magelang*.
- Atzori, L., Iera, A., & Morabito, G. (2017). Understanding the *Internet of Things*: definition, potentials, and societal role of a fast evolving paradigm. *Ad Hoc Networks*, 56, 122–140.
- Benmhahe, B., & Chentoufi, J. A. (2021). Automated pavement distress detection, classification and measurement: A review. *International Journal of Advanced Computer Science and Applications*, 12(8).
- Caliendo, C. (2012). Local calibration and implementation of the mechanistic-empirical pavement design guide for flexible

- pavement design. *Journal of Transportation Engineering*, 138(3), 348–360.
- Chang, J.-R. (2019). Asphalt Pavement Performance Analysis Using “Big Data” Computing Approaches. *Journal of Testing and Evaluation*, 47(3), 1732–1744.
- Das, A. (2023). *Analysis of Pavement Structures*. CRC Press.  
<https://books.google.co.id/books?id=1pm-EAAQBAJ>
- Delatte, N. J. (2017). *Concrete Pavement Design, Construction, and Performance*. Taylor & Francis Group.  
<https://books.google.co.id/books?id=z-f5twEACAAJ>
- Di Graziano, A., Marchetta, V., & Cafiso, S. (2020). Structural health monitoring of asphalt pavements using smart sensor networks: A comprehensive review. *Journal of Traffic and Transportation Engineering (English Edition)*, 7(5), 639–651.
- Douglas, R. A. (2018). *Low-Volume Road Engineering: Design, Construction, and Maintenance*. CRC Press.  
<https://books.google.co.id/books?id=Jjk0CwAAQBAJ>
- Fadly, I., & Widarto, H. (2020). Analisis Kerusakan Dini Perkerasan Lentur Akibat Beban Berlebih (Overload) Pada Ruas Jalan Poros Pinrang Polewali Mandar. *Jurnal Rekayasa Teknik*, 1–12.
- France-Mensah, J., & O’Brien, W. J. (2018). Budget allocation models for pavement maintenance and rehabilitation: Comparative case study. *Journal of Management in Engineering*, 34(2), 5018002.
- Gonçalves, M. C., & Margarido, F. (2016). *Materials for Construction and Civil Engineering: Science, Processing, and Design*. Springer International Publishing.  
<https://books.google.co.id/books?id=EUNavgAACAAJ>
- Goodchild, M. F. (2009). Geographic information systems and science: today and tomorrow. *Annals of GIS*, 15(1), 3–9.
- Gouveia, B. G., Donato, M., & Da Silva, M. A. V. (2022). Life cycle assessment in road pavement infrastructures: a review. *Civil Engineering Journal*, 8(6), 1304–1315.
- Gudipudi, P. P., Underwood, B. S., & Zalghout, A. (2017). Impact of climate change on pavement structural performance in the United States. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 57, 172–184.
- Haas, R., Tighe, S., Dore, G., & Hein, D. (2007). Mechanistic-empirical pavement design: Evolution and future challenges. *Annual Review of Materials Research*, 37, 1–26.

*Conference and Exhibition of the Transportation Association of Canada.*

- Hall, K. D., & Schwartz, C. W. (2018). Development of structural design guidelines for porous asphalt pavement. *Transportation Research Record*, 2672(40), 197–206.
- Haoran, Z., Zidong, Z., Min, W., Xin, Y., Yongxin, W., Chen, C., & Jun, Q. (2024). Integrated design optimization method for pavement structure and materials based on further development of finite element and particle swarm optimization algorithm. *Construction and Building Materials*, 426, 136080.
- Harfa, W., Yermadona, H., & Putra, Y. (2023). EVALUASI KONDISI PERKERASAN JALAN MENGGUNAKAN METODE PCI DAN METODE BINA MARGA (Payakumbuh-Lintau, Kabupaten Lima Puluh Kota). *Ensiklopedia Research and Community Service Review*, 2(2), 155–162.
- Hossain, M. U., Wong, J. J. Y., Ng, S. T., & Wang, Y. (2022). Sustainable design of pavement systems in highly urbanized context: A lifecycle assessment. *Journal of Environmental Management*, 305, 114410.
- Hu, W., Shu, X., & Huang, B. (2019). Sustainability innovations in transportation infrastructure: An overview of the special volume on sustainable road paving. *Journal of Cleaner Production*, 235, 369–377.
- Huang, Y. H. (2004). *Pavement analysis and design* (Vol. 2). Pearson/Prentice Hall Upper Saddle River, NJ.
- Jamshidi, A., & White, G. (2019). Use of recyclable materials in pavement construction for environmental sustainability. *Proceedings of the Eighteenth Annual International Conference on Pavement Engineering*, Liverpool, UK, 27–28.
- Juharni, R. (2015). *Analisa Penggunaan Reclaimed Asphalt Pavement (RAP) Sebagai Bahan Campuran Aspal Dingin Jenis Ogems Dengan Menggunakan Aspal Emulsi Modifikasi (Studi Kasus Material RAP Jalan Kolonel H)*. Analysis The Use Of Reclaimed Of Asphalt Pavement (RAP) As a Cold. Tesis Rc-142501. Institut Teknologi Sepuluh November Surabaya.
- Khan, K., Ahmad, W., Amin, M. N., Khan, S. A., Deifalla, A. F., & Younes, M. Y. M. (2023). Research evolution on self-healing asphalt: A scientometric review for knowledge mapping. *Reviews*

- on Advanced Materials Science*, 62(1), 20220331.
- Kodippilly, S., Yeaman, J., Henning, T., & Tighe, S. (2020). Effects of extreme climatic conditions on pavement response. *Road Materials and Pavement Design*, 21(5), 1413–1425.
- Koerner, R. M. (2012). *Designing with Geosynthetics - 6Th Edition Vol. I* (Issue v. 1). Xlibris US. <https://books.google.co.id/books?id=qZtSAAAAQBAJ>
- 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.
- Li, Z., Zhou, X., Ma, H., & Hou, D. (2022). *Advanced Concrete Technology*. Wiley. <https://books.google.co.id/books?id=Xet9EAAAQBAJ>
- Lia, N., & Mahardi, P. (2022). Evaluasi Kinerja Struktur Perkerasan Jalan Lentur Menggunakan Aplikasi KENPAVE. *Jurnal Rekayasa Sipil*, 4(2).
- Longley, P. A., Goodchild, M. F., Maguire, D. J., & Rhind, D. W. (2015). *Geographic Information Science and Systems*. Wiley. [https://books.google.co.id/books?id=C\\_EwBgAAQBAJ](https://books.google.co.id/books?id=C_EwBgAAQBAJ)
- Lu, D., Jiang, X., Tan, Z., Yin, B., Leng, Z., & Zhong, J. (2023). Enhancing sustainability in pavement Engineering: A-state-of-the-art review of cement asphalt emulsion mixtures. *Cleaner Materials*, 9, 100204.
- Luo, X., Gu, F., Ling, M., & Lytton, R. L. (2018). Review of mechanistic-empirical modeling of top-down cracking in asphalt pavements. *Construction and Building Materials*, 191, 1053–1070.
- Magdy, E., El-Badawy, S., Ibrahim, M., & Elbeltagi, E. (2024). Modeling pavement deterioration and pavement maintenance management optimization. *Journal of Transportation Engineering, Part B: Pavements*, 150(2), 4024017.
- Mantri, P., & Yojana, G. S. (2022). *Full Depth Reclamation for Rehabilitation of Low Volume Roads*.
- Mehta, P. K., & Monteiro, P. J. M. (2006). *Concrete microstructure, properties, and materials*. McGraw-hill.
- Mejlun, Ł., Judycki, J., & Dołycki, B. (2017). Comparison of elastic and viscoelastic analysis of asphalt pavement at high temperature. *Procedia Engineering*, 172, 746–753.

- Mohmand, Y. T., Wang, A., & Saeed, A. (2017). The impact of transportation infrastructure on economic growth: empirical evidence from Pakistan. *Transportation Letters*, 9(2), 63–69.
- Niken, C., Karami, M., & Sasana, P. (2020). Deep-hair-cracks mechanism of rigid pavement in humid tropical weather. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 857(1), 12028.
- Norouzi, A., Sabouri, M., & Kim, Y. R. (2014). Evaluation of the fatigue performance of asphalt mixtures with high RAP content. *Journal of Tylor and Francis Group*, 1069–1077.
- Papagiannakis, A. T., & Masad, E. A. (2024). *Pavement Design and Materials*. Wiley.  
<https://books.google.co.id/books?id=P18JEQAAQBAJ>
- Poulikakos, L. D., Papadaskalopoulou, C., Hofko, B., Gschösser, F., Falchetto, A. C., Bueno, M., Arraigada, M., Sousa, J., Ruiz, R., & Petit, C. (2017). Harvesting the unexplored potential of European waste materials for road construction. *Resources, Conservation and Recycling*, 116, 32–44.
- Rana, M. M., & Hossain, K. (2023). Connected and autonomous vehicles and infrastructures: A literature review. *International Journal of Pavement Research and Technology*, 16(2), 264–284.
- Rathore, M., Zaumanis, M., & Haritonovs, V. (2019). Asphalt recycling technologies: a review on limitations and benefits. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 660(1), 12046.
- Riyadhsyah, T., Abdullah, F., Kurniati, K., & Gani, F. A. (2024). Analisis Penggunaan dan Penerapan Geosintetik pada Konstruksi Perkerasan Jalan. *Prosiding Seminar Nasional Politeknik Negeri Lhokseumawe*, 7(1), 145–150.
- Robinson, R., & Thagesen, B. (2018). *Road Engineering for Development*. CRC Press. <https://books.google.co.id/books?id=UpZDwAAQBAJ>
- Roja, K. L., Masad, E., & Mogawer, W. (2021). Performance and blending evaluation of asphalt mixtures containing reclaimed asphalt pavement. *Road Materials and Pavement Design*, 22(11), 2441–2457.
- Sarsam, S. I. (2016). Pavement maintenance management system: a review. *Trends in Transport Engineering and Applications*, 3(2), 19–30.

- Savan, C. M., Ng, K. W., & Ksaibati, K. (2016). Benefit-cost analysis and application of intelligent compaction for transportation. *Transportation Geotechnics*, 9, 57–68.
- Sayers, M. W., Gillespie, T. D., & Queiroz, C. A. V. (1986). The international road roughness experiment: A basis for establishing a standard scale for road roughness measurements. *Transportation Research Record*, 1084, 76–85.
- Sivagnanasuntharam, S., Sounthararajah, A., Ghorbani, J., Bodin, D., & Kodikara, J. (2023). A state-of-the-art review of compaction control test methods and intelligent compaction technology for asphalt pavements. *Road Materials and Pavement Design*, 24(1), 1–30.
- Su, N., Xiao, F., Wang, J., & Amirkhanian, S. (2017). Characterizations of base and subbase layers for Mechanistic-Empirical Pavement Design. *Construction and Building Materials*, 152, 731–745.
- Tajudin, A. N. (2021). Evaluasi kerusakan perkerasan lentur dengan metode PCI dan sdi (studi kasus: jalan Jatisari, Karawang). *JMTS: Jurnal Mitra Teknik Sipil*, 845–854.
- Tamagusko, T., Gomes Correia, M., & Ferreira, A. (2024). Machine Learning Applications in Road Pavement Management: A Review, Challenges and Future Directions. *Infrastructures*, 9(12).
- Thom, N. (2024). *Principles of Pavement Engineering*. Emerald Publishing Limited.  
<https://books.google.co.id/books?id=BqcWEQAAQBAJ>
- Turk, J., Pranjić, A. M., Mladenovič, A., Cotić, Z., & Jurjavčič, P. (2016). Environmental comparison of two alternative road pavement rehabilitation techniques: Cold-in-place-recycling versus traditional reconstruction. *Journal of Cleaner Production*, 121, 45–55.
- Vaitkus, A., Gražulytė, J., Kleizienė, R., Vorobjovas, V., & Šernas, O. (2019). Concrete modular pavements—types, issues and challenges. *The Baltic Journal of Road and Bridge Engineering*, 14(1), 80–103.
- Vizzari, D., Gennesseaux, E., Lavaud, S., Bouron, S., & Chailleux, E. (2021). Pavement energy harvesting technologies: a critical review. *RILEM Technical Letters*, 6, 93–104.
- Wang, W., Wang, L., Xiong, H., & Luo, R. (2019). A review and perspective for research on moisture damage in asphalt pavement induced by dynamic pore water pressure. *Construction and Building Materials*, 204, 631–642.

- Westergaard, H. M. (1927). Analysis of stresses in concrete pavements due to variations of temperature. *Highway Research Board Proceedings*, 6, 201–215.
- Wu, S., & Tahri, O. (2021). State-of-art carbon and graphene family nanomaterials for asphalt modification. *Road Materials and Pavement Design*, 22(4), 735–756.
- Yunianta, A., & Setiadji, B. H. (2022). *Sistem drainase jalan raya yang berkelanjutan*. TOHAR MEDIA.  
<https://books.google.co.id/books?id=vLJ0EAAAQBAJ>
- Yunus, A., Said, L. B., & Alifuddin, A. (2022). Analisis penentuan penanganan jalan nasional metode international roughness index (IRI) dan pavement condition index (PCI): Studi kasus: ruas jalan Kalukku-Bts Kota Mamuju. *Jurnal Konstruksi: Teknik, Infrastruktur Dan Sains*, 1(1), 10–21.
- Yusuf, J., Widarto, H., & Hidayat, A. (2021). Studi Penggunaan Aspal Modifikasi pada Campuran Aspal Poros. *Jurnal Karajata Engineering*, 1(1), 23–31.
- Zafar, M. S., Shah, S. N. R., Memon, M. J., Rind, T. A., & Soomro, M. A. (2019). Condition survey for evaluation of pavement condition index of a highway. *Civil Engineering Journal*, 5(6), 1367–1383.
- Zhou, J., Wang, Y., & Zhou, W. (2025). Efficient instance segmentation framework for UAV-based pavement distress detection. *Automation in Construction*, 175, 106195.
- Zhu, Y., Li, H., Yang, B., Zhang, X., Mahmud, S., Zhang, X., Yu, B., & Zhu, Y. (2021). Permeable pavement design framework for urban stormwater management considering multiple criteria and uncertainty. *Journal of Cleaner Production*, 293, 126114.





# GLOSARIUM

---

<b>Agregat</b>	Bahan granular seperti batu pecah, pasir, atau kerikil yang berfungsi sebagai tulang utama dalam struktur perkerasan jalan.
<b>Aspal</b>	Bahan pengikat berwarna hitam pekat yang dihasilkan dari pengolahan minyak bumi dan digunakan untuk merekatkan agregat dalam campuran perkerasan lentur.
<b>Beban</b>	Tekanan atau gaya yang ditimbulkan oleh roda kendaraan dan disalurkan melalui lapisan perkerasan ke tanah dasar.
<b>Beton</b>	Campuran homogen antara semen, air, dan agregat yang setelah mengeras membentuk material kuat untuk konstruksi perkerasan kaku.
<b>Deformasi</b>	Perubahan bentuk material perkerasan karena pengaruh beban berulang, suhu, dan sifat mekanik bahan penyusunnya.
<b>Desain</b>	Proses perancangan teknis untuk menentukan ketebalan, jenis material, dan struktur perkerasan agar sesuai dengan beban dan umur rencana jalan.
<b>Drainase</b>	Sistem pengaliran air yang dirancang untuk menjaga kondisi jalan tetap kering sehingga mencegah penurunan kekuatan lapisan perkerasan.
<b>Elastisitas</b>	Sifat material yang memungkinkan kembali ke bentuk semula setelah mengalami deformasi akibat beban sementara.

<b>Evaluasi</b>	Proses penilaian kondisi fisik dan struktural perkerasan guna menentukan tindakan perawatan atau perbaikan yang diperlukan.
<b>Fondasi</b>	Lapisan dasar yang berfungsi mendistribusikan beban dari perkerasan atas ke tanah dasar dengan aman dan merata.
<b>Kekuatan</b>	Kemampuan suatu material atau struktur perkerasan dalam menahan gaya tekan, tarik, atau geser tanpa mengalami kegagalan.
<b>Kepadatan</b>	Tingkat kerapatan partikel material hasil proses pemasakan yang memengaruhi kekuatan dan ketahanan lapisan perkerasan.
<b>Ketahanan</b>	Daya tahan perkerasan terhadap pengaruh beban lalu lintas, cuaca, dan waktu agar tetap berfungsi sesuai umur rencana.
<b>Konstruksi</b>	Tahapan pelaksanaan pembangunan fisik perkerasan jalan yang meliputi persiapan, penempatan material, pemasakan, dan pengujian.
<b>Lalu lintas</b>	Jumlah dan jenis kendaraan yang melintasi jalan dalam periode tertentu dan menjadi dasar perencanaan beban desain perkerasan.
<b>Lapisan</b>	Bagian-bagian dari struktur perkerasan yang tersusun secara berurutan dari permukaan hingga tanah dasar sesuai fungsi mekanisnya.
<b>Material</b>	Segala jenis bahan penyusun perkerasan seperti aspal, agregat, dan tanah yang harus memenuhi spesifikasi teknis tertentu.

<b>Pemeliharaan</b>	Serangkaian kegiatan rutin dan berkala untuk mempertahankan kondisi perkerasan agar tetap dalam keadaan laik fungsi.
<b>Perkerasan</b>	Struktur berlapis pada jalan yang berfungsi menyalurkan beban lalu lintas ke tanah dasar secara aman dan efisien agar tidak terjadi kerusakan pada permukaan maupun pondasi.
<b>Rehabilitasi</b>	Upaya perbaikan besar pada perkerasan yang mengalami penurunan kinerja signifikan agar kembali memenuhi standar pelayanan jalan.
<b>Stabilitas</b>	Kemampuan lapisan perkerasan untuk mempertahankan bentuk dan kekuatan struktur di bawah pengaruh beban berulang dan perubahan lingkungan.
<b>Subgrade</b>	Lapisan tanah dasar yang menjadi tumpuan utama seluruh struktur perkerasan dan harus memiliki daya dukung yang memadai.
<b>Tegangan</b>	Gaya internal yang timbul dalam material perkerasan akibat pengaruh beban luar dan perubahan suhu.





# INDEKS

---

---

## A

aksesibilitas · 2  
*Algoritma* · 184  
audit · 195

---

## B

*big data* · 55

---

## D

deduksi · 202  
digitalisasi · 9, 14, 67  
distribusi · 1, 3, 5, 6, 9, 12, 13,  
21, 22, 23, 24, 25, 28, 29, 30,  
31, 33, 34, 36, 37, 38, 39, 42,  
52, 56, 58, 61, 63, 68, 73, 76,  
83, 106, 109, 111, 112, 117,  
122, 123, 124, 125, 127, 128,  
130, 131, 134, 136, 140, 141,  
147, 168, 187, 194, 196, 199,  
207, 214, 222, 223, 224, 229,  
240, 244

---

## E

ekonomi · 1, 2, 3, 4, 6, 11, 49,  
67, 68, 71, 73, 87, 130, 179,  
181, 216, 218, 233

ekspansi · 39, 47, 64, 118, 123,  
124, 134, 138, 139, 152, 155,  
166, 168, 176, 208  
emisi · 12, 14, 16, 53, 54, 93,  
97, 178, 179, 180, 218, 219,  
221, 231, 233, 234, 235, 238  
empiris · 13, 24, 25, 30, 39, 40,  
41, 43, 44, 47, 51, 52, 57, 58,  
62, 67, 99, 100, 101, 102,  
103, 105, 107, 108, 109, 110,  
111, 112, 115, 116, 126, 129,  
132, 133, 135, 144, 194

---

## F

finansial · 186  
fleksibilitas · 13, 62, 65, 191,  
236, 239, 241, 244  
fluktuasi · 15, 18, 44, 64, 66,  
118  
fundamental · 1, 21, 24, 28, 34,  
36

---

## G

geografis · 14, 103

---

## I

implikasi · 26  
infrastruktur · 1, 2, 3, 4, 7, 14,  
16, 17, 18, 19, 55, 59, 60, 61,  
71, 92, 102, 103, 108, 130,

143, 145, 147, 153, 179, 183, 188, 191, 204, 205, 213, 217, 221, 225, 226, 227, 228, 230, 232, 233, 235, 237, 238, 239, 240, 244, 262  
inovatif · 7, 16, 18, 19, 33, 73, 79, 86, 92, 93, 97, 144, 180, 220, 221, 232, 242  
integrasi · 3, 17, 55, 60, 103, 145, 188, 191, 212, 213, 214, 215, 217, 223, 224, 225, 228, 229, 230, 233, 241  
integritas · 44, 45, 63, 65, 88, 92, 135, 136, 144, 180, 224  
interaktif · 212, 214, 215  
investasi · 3, 19, 71, 119, 214, 237

---

## K

kolaborasi · 67, 214, 216  
komprehensif · 17, 23, 25, 49, 57, 67, 73, 83, 99, 121, 132, 205, 262  
konsistensi · 16, 59, 208, 213, 231

---

## M

metodologi · 202  
mikroorganisme · 59

---

## O

otoritas · 4, 196

---

## P

politik · 3  
proyeksi · 12, 18, 130

---

## R

*real-time* · 17, 26, 54, 60, 66, 67, 119, 145, 161, 181, 182, 187, 188, 189, 191, 207, 208, 209, 210, 213, 214, 215, 223, 224, 225, 226, 227, 230, 233, 241  
regulasi · 16, 17, 215  
revolusi · 66, 187, 221

---

## S

stabilitas · 10, 11, 42, 44, 46, 47, 50, 53, 75, 77, 78, 80, 81, 82, 86, 87, 88, 90, 93, 96, 97, 118, 142, 148, 168, 180, 193, 194, 219, 236, 240, 242  
stakeholder · 215  
*sustainability* · 249, 250

---

## T

transformasi · 26  
transparansi · 187

# BIOGRAFI PENULIS



## Dr. Ir. Nusa Sebayang, M.T.

Lahir di Karo, 18 Februari 1967. Menyelesaikan Pendidikan S 1 Teknik Sipil di Universitas Sumatera Utara Tahun 1991, kemudian melanjutkan S2 Teknik Sipil di ITB lulus tahun 1999. Lulus S 3 di Program Studi Teknik Sipil Bidang Transportasi di Universitas Brawijaya Malang. Saat ini sebagai Dosen di Institut Teknologi Nasional Malang Program Studi S1 dan S 2 Teknik Sipil. Memiliki Bidang Keahlian Teknik Sipil Transportasi. Merupakan Ahli Utama di Bidang Transportasi dan Jalan Raya.



## Ir. Taufikkurrahman, S.T., M.T.

Lahir di Palangkaraya 8 Juli 1973, Meraih gelar Sarjana Teknik Sipil (S1) di Jurusan Teknik Sipil Institut Teknologi Nasional Malang pada Tahun 1997. Gelar Magister Teknik (S2) diperoleh dari Program Pascasarjana Universitas Brawijaya Malang pada Bidang Teknik Sipil pada Tahun 2001. Saat Ini sedang menempuh Program Doktor Ilmu Teknik Sipil. Sejak tahun 2005 hingga saat ini, penulis menjadi pengajar di Program Studi Teknik Sipil Universitas Wisnuwardhana Malang serta aktif dalam kegiatan Penelitian dan Pengabdian di kota Malang.



### **Ir. Lila Kurnia Wardani, S.T., M.T.**

Lahir di Malang, 4 September 1989. Menyelesaikan studi S2 di Program Studi Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Brawijaya pada tahun 2014. Saat ini mengabdikan diri sebagai Dosen Program Studi Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Wisnuwardhana Malang.



### **Ir. Muhammad Isradi, S.T., M.T., Ph.D., IPM.**

Merupakan dosen tetap Teknik Sipil bidang Transportasi Universitas Mercu Buana Jakarta. Menyelesaikan pendidikan doktor di Universitas Tun Hussein Onn Malaysia-Malaysia. Dengan pengalaman luas dalam mengajar dan penelitian di bidang transportasi dan perancangan infrastruktur. Saat ini, mengampu mata kuliah Perancangan Perkerasan Jalan, Rekayasa Transportasi, Sistem Angkutan Umum, Perancangan Jalan Rel, Metode dan Peralatan Kosntruksi Lanjut, Manajemen SDM Komunikasi Proyek dan Metodologi Penelitian untuk program Strata 1 (S1) dan Magister (S2) Teknik Sipil. Saat ini aktif sebagai Ketua Bidang Keahlian Transportasi dan sebagai pengelola jurnal di Fakultas Teknik, serta aktif sebagai reviewer dari berbagai jurnal baik jurnal nasional maupun jurnal internasional.

*Buku Referensi*

# PERKERASAN JALAN RAYA

*TEORI, DESAIN, DAN APLIKASI*

Buku referensi "Perkerasan Jalan Raya: Teori, Desain, dan Aplikasi" membahas secara komprehensif konsep, prinsip, dan penerapan teknik perkerasan jalan yang menjadi dasar penting dalam pembangunan infrastruktur transportasi modern. Disusun dengan pendekatan teoritis dan praktis, buku referensi ini membahas berbagai aspek mulai dari karakteristik material, analisis beban lalu lintas, metode desain perkerasan lentur dan kaku, hingga evaluasi kinerja serta strategi pemeliharaan jalan. Selain menampilkan teori dasar, buku referensi ini juga dilengkapi dengan contoh perhitungan, studi kasus lapangan, dan pembahasan terhadap standar desain nasional serta praktik terbaik internasional. Diharapkan, buku referensi ini dapat menjadi referensi utama bagi mahasiswa teknik sipil, akademisi, maupun praktisi di bidang konstruksi jalan dalam memahami dan menerapkan prinsip-prinsip perkerasan secara efektif dan berkelanjutan.



mediapenerbitindonesia.com  
 +6281362150605  
 Penerbit Idn  
 @pt.mediapenerbitidn

ISBN 978-634-7457-39-4



9 78634 457394