

## **BAB 2**

### **KAJIAN PUSTAKA DAN KERANGKA BERPIKIR**

#### **2.1. Peran Penting Sektor Konstruksi dalam Pembangunan yang Keberlanjutan**

Pembangunan jalan berdampak terhadap lingkungan, dimana konstruksi jalan merupakan salah satu sektor yang menghabiskan energi paling banyak dan berkontribusi terhadap emisi karbon dioksida. Dalam proses pembangunan jalan, kebutuhan material sangat tergantung pada sumber daya alam seperti tanah, batu, kapur, semen, dan aspal. Banyak penelitian telah menunjukkan bahwa pembangunan jalan dengan menggunakan metode konvensional dari aspal dapat menghasilkan emisi karbon dan konsumsi energi yang besar, yang tidak sesuai dengan prinsip pembangunan berkelanjutan dan pelestarian lingkungan di lokasi pembangunan tersebut (Zheng et al., 2019). Sejarah Teknik Sipil menunjukkan bahwa jaringan jalan raya merupakan salah satu prestasi terbesar dalam pengembangan infrastruktur, yang memainkan peran penting dalam pertumbuhan ekonomi Amerika Serikat. Dalam hal konstruksi perkerasan jalan, aspal dan semen merupakan dua bahan yang paling sering digunakan. Sebanyak 83% dari semua jalan dan trotoar di Amerika Serikat menggunakan jenis fleksibel (dengan permukaan aspal), sedangkan 7% terbuat dari jenis kaku (dengan permukaan beton semen Portland, dengan atau tanpa permukaan aspal), dan hampir 10% terbuat dari jenis komposit, seperti permukaan aspal yang diletakkan di atas dasar beton semen Portland. Namun, penggunaan aspal dan semen dalam konstruksi perkerasan jalan telah dikritik karena berdampak negatif pada lingkungan dan berkontribusi pada masalah pemanasan global (Mazumder et al., 2016). Meskipun pembangunan jalan merupakan aspek yang krusial, kesadaran terhadap dampak lingkungan yang timbul dari pelaksanaan program ini masih terbilang terbatas. Lebih lanjut, pembangunan jalan yang telah terealisasi pada periode sebelumnya memiliki potensi merusak struktur infrastruktur dan potensial untuk menimbulkan kerugian pada lingkungan sekitarnya. Kondisi serupa juga dapat diamati dalam konteks pengembangan teknologi, seperti yang telah disorot dalam studi Zapata and Gambatese, (2005).

Dalam rangka meningkatkan kesadaran global terhadap dampak lingkungan dan pentingnya konstruksi berkelanjutan maka semua sektor industri semakin serius dalam mempertimbangkan dampak lingkungan. Protokol Kyoto tahun 1997 mendefinisikan enam jenis gas rumah kaca yang harus dikurangi karena terkait dengan pemanasan global, termasuk karbon dioksida (CO<sub>2</sub>), metana (CH<sub>4</sub>), nitro oksida (N<sub>2</sub>O), hidrofluorokarbon (HFC), perfluorokarbon (PFC), dan sulfur hexafluoride (SF<sub>6</sub>). Film dokumenter Al Gore, *An Inconvenient Truth*, telah memicu diskusi tentang pemanasan global dan gas rumah kaca (GRK) di kalangan pecinta lingkungan maupun masyarakat umum (Hong et al., 2014). Menurut *Association for the Advancement of Cost Engineering* (AACE) International pada tahun 2005, fase studi kelayakan dalam proyek sipil hanya dapat mengidentifikasi sekitar 15% dari keseluruhan proyek (Kim et al., 2012a). Konsumsi energi merupakan faktor penting yang mempengaruhi proyek perkerasan, karena dapat menyebabkan biaya yang tinggi dan emisi gas rumah kaca yang signifikan (Wang and Liu, 2012). Sebagai contoh, penelitian di *Asphalt Mixing Plant* (AMP) menunjukkan bahwa energi membentuk sekitar 12 - 18% dari total biaya produksi campuran, dengan mayoritas energi yang digunakan berasal dari bahan bakar fosil yang menghasilkan emisi gas rumah kaca (Chong et al., 2016).

Dalam upaya untuk membangun secara berkelanjutan, aspek lingkungan dan dampak potensial dari calon proyek semakin menjadi perhatian dalam studi kelayakan. Sejak Protokol Kyoto tahun 1997, emisi gas rumah kaca telah menjadi kriteria penting dalam lingkungan dengan tujuan membatasi emisi tersebut. Sebagai salah satu sektor yang memproduksi banyak gas rumah kaca, industri konstruksi mulai mempertimbangkan penilaian emisi gas rumah kaca dalam menentukan prioritas proyek yang layak. Namun kurangnya perhatian pada konstruksi jalan dalam penilaian emisi, dimana penelitian tentang emisi gas rumah kaca pada infrastruktur jalan masih terbilang sedikit, dan ini mungkin disebabkan oleh kurangnya informasi yang relevan pada tahap awal proyek tersebut (Kim et al., 2012a). Kebanyakan penelitian yang dilakukan fokus pada evaluasi energi dan emisi gas rumah kaca pada bangunan gedung, seperti:

- Membuat model konsumsi energi dan emisi karbon dari sektor konstruksi bangunan, dengan pendekatan *Life Cycle Assessment* (LCA) berbasis proses. Sehingga pada tahun 2016, total konsumsi energi sektor konstruksi bangunan

adalah 411 juta TCE, terhitung sekitar 9% dari total konsumsi energi di China (Zhang et al., 2019).

- Melakukan penilaian energi yang terkandung dan dioperasikan pada bangunan yang ada, simulasi energi operasi dimodelkan menggunakan *software CAD* yaitu *Designer's Simulation Toolkit* (DeST) pada studi kasus bangunan di China (Ding and Ying, 2019).
- Membuat pemodelan penggunaan energi pada bangunan tempat tinggal, bagaimana keputusan desain mempengaruhi kinerja energi final di berbagai iklim Chili. Studi tersebut menggambarkan bagaimana keputusan desain bangunan dapat berdampak signifikan pada kinerja energi final (Simon et al., 2019).
- Membuat kerangka kerja alat optimasi desain amplop bangunan hemat energi. Penelitian ini menyajikan kerangka kerja untuk mengembangkan alat pengoptimalan desain multi-tujuan yang mampu mengidentifikasi desain dengan biaya siklus hidup terendah, emisi siklus hidup terendah, dan kepuasan termal penghuni tertinggi (Mostavi et al., 2018).
- Membuat model dan metode estimasi serta perbandingan emisi langsung dengan melakukan studi kasus konstruksi bangunan di Australia. Kerangka kerja dibentuk supaya memberikan prosedur sistematis guna membantu pengambilan keputusan dalam mengurangi emisi langsung pada tahap konstruksi (Sandanayake et al., 2016).
- Mendesain struktur beton bertulang berkelanjutan melalui optimalisasi emisi CO<sub>2</sub>, yang dikurangi secara signifikan melalui penggunaan beton dan baja yang lebih efisien (Yeo and Potra, 2015).
- Melakukan tinjauan model stok bangunan *bottom-up* untuk konsumsi energi di sektor perumahan (Kavgic et al., 2010).
- Mengembangkan pendekatan optimasi untuk efisien energi bangunan dengan alat pengambilan keputusan dalam proses desain garis besar yang disebut *3D-Environmental Assessment Trade-off Tool* (3D-EATT) (Loh et al., 2009).

Peningkatan signifikan dalam tingkat pertumbuhan dan populasi di seluruh dunia telah memunculkan keprihatinan signifikan tentang pemenuhan kebutuhan pasokan dan penggunaan energi. Dunia telah mengamati krisis energi serius yang cenderung memburuk dan merusak infrastruktur dan ekonomi banyak orang negara di seluruh

dunia. Membuat jalan baru dan mengembangkan jaringan jalan yang luas menjadi tidak layak dilakukan selama terjadi krisis energi, karena bahan bakar yang dibutuhkan untuk membakar campuran aspal dan agregat menjadi sangat mahal dan pasokannya pun menjadi tidak kontinu (Shah et al., 2018). Dalam beberapa tahun terakhir, dengan perkembangan pesat pembangunan jalan raya dan munculnya masalah lingkungan, untuk mengendalikan atau menghindari dampak negatif terhadap lingkungan dari konstruksi jalan raya, China secara bertahap telah mempelajari pembentukan berbagai manajemen lingkungan jalan raya, peraturan teknis dan standar. Konstruksi hijau menjadi salah satu solusi untuk melindungi lingkungan dan mengurangi konsumsi energi akibat jalan raya (Dong et al., 2019).

Pemerintah Indonesia telah berkomitmen untuk mengurangi dampak pemanasan global dengan mengurangi emisi sebesar 26% pada tahun 2020. Namun, pada tahun 2015, target tersebut mengalami revisi menjadi 29% pada tahun 2030 secara independen atau 41% dengan kerja sama internasional. Komitmen ini melibatkan berbagai aspek seperti mitigasi dan adaptasi di sektor kehutanan, energi (termasuk transportasi), limbah, proses industri, penggunaan produk, serta pertanian. Untuk mencapai tujuan ini, diperlukan upaya bersama dalam bidang teknologi, kelembagaan, dan perilaku. Salah satu cara untuk mengurangi penggunaan energi adalah melalui efisiensi energi. Meskipun banyak negara telah mengadopsi kebijakan untuk mengurangi emisi, yang lebih penting adalah implementasinya. Oleh karena itu, strategi pengurangan emisi harus melibatkan semua sektor dan wilayah. Di sektor konstruksi, langkah tindak lanjut dari komitmen ini termasuk penerbitan Peraturan Menteri Pekerjaan Umum No. 11 tahun 2012 tentang Rencana Aksi Nasional Mitigasi dan Adaptasi Perubahan Iklim 2012-2020, serta Peraturan Menteri PUPR No. 02/PRT/M/2015 tentang Bangunan Hijau yang bertujuan untuk mengurangi emisi gas rumah kaca (GRK) yang berasal dari bangunan. Penting untuk dicatat bahwa strategi pengurangan emisi harus dilakukan di semua sektor dan wilayah (Wibowo et al., 2018).

Peraturan Menteri Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat (PUPR) Nomor 5 tahun 2015 memberikan panduan umum bagi penyelenggara infrastruktur di sektor pekerjaan umum dan permukiman untuk menerapkan konstruksi yang berkelanjutan. Penyelenggara proyek jalan diwajibkan untuk mengadopsi pendekatan konstruksi yang berkelanjutan dan memenuhi persyaratan teknis serta prinsip-prinsip berkelanjutan yang

meliputi aspek sosial, ekonomi, dan lingkungan. Tujuan dari hal ini adalah untuk mempertimbangkan penggunaan sumber daya agar tetap tersedia untuk generasi mendatang. Dalam Rencana Strategis Kementerian PUPR 2015-2019, yang diatur oleh Peraturan Menteri PUPR No. 13.1/PRT/M/2015, disebutkan bahwa kebijakan penyelenggaraan infrastruktur jalan harus mempertimbangkan aspek lingkungan dan sosial. Tujuannya adalah untuk memastikan bahwa pembangunan di sektor PUPR dilakukan secara terpadu dan berkelanjutan mulai dari tahap perencanaan hingga tahap rekonstruksi, sehingga diakui sebagai infrastruktur yang berkelanjutan (Lawalata, 2019).

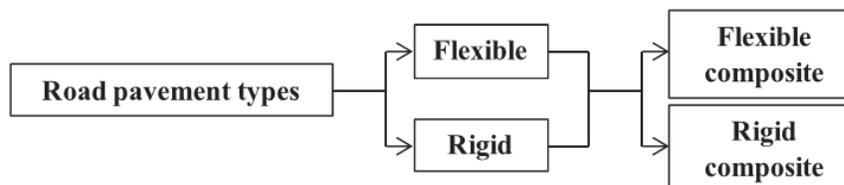
Pembangunan jalan memiliki dampak besar pada lingkungan, ekonomi, dan masyarakat (Verán-Leigh et al., 2019). Oleh karena itu, pilihan jenis perkerasan jalan memiliki implikasi yang luas. Seluruh fase pengembangan jalan, mulai dari konstruksi hingga operasi, memerlukan konsumsi besar sumber daya ekosistem seperti barang dan jasa, serta menghasilkan limbah dan emisi yang berdampak pada lingkungan (Kucukvar and Tatari, 2012). Saat ini penentuan jenis lapis permukaan jalan lebih ditentukan oleh pertimbangan teknis dan isu ekonomi serta keselamatan, dan jarang mempertimbangkan penggunaan energi dalam pengambilan keputusan (Tarefder et al., 2012). Penggabungan informasi konsumsi energi dalam pemilihan jenis perkerasan dapat membantu *stakeholder* (insinyur dan legislator) dalam merancang dan membangun jaringan jalan raya yang lebih maju yang meminimalkan pengeluaran energi dalam pembangunannya (Zapata and Gambatese, 2005). Proyek konstruksi yang benar-benar berkelanjutan harus memasukkan masalah ekonomi, sosial dan lingkungan dalam tahap perencanaan, konstruksi dan penghancuran (*demolition*), dengan tujuan menyediakan bangunan yang terjangkau, mudah diakses, dan ramah lingkungan. Sementara desain tradisional dan kegiatan konstruksi terfokus pada masalah biaya, kinerja dan kualitas (Gulotta et al., 2019). Perencana dan konstruktor harus melakukan evaluasi setiap proyek tidak hanya dengan pendekatan ekonomi berupa kajian investasi modal awal tetapi dengan mengevaluasi seluruh siklus hidup bangunan. Desain dan konstruksi berkelanjutan, minimalisasi konsumsi sumber daya dan degradasi lingkungan serta menciptakan lingkungan yang sehat dan nyaman bagi manusia (Sev, 2009).

Secara umum, ada tiga alternatif konstruksi perkerasan jalan, yaitu perkerasan lentur dan perkerasan kaku dan kombinasi keduanya (perkerasan komposit) (Thives and

Ghisi, 2017). Pada tahap inisiasi dan desain, pemangku kepentingan (pemilik dan perencana) dihadapkan pada pilihan untuk menentukan jenis perkerasan yang akan digunakan sesuai dengan anggaran yang disediakan, dan jenis konstruksi yang paling ekonomis berdasarkan *discounted lifecycle cost* yang terendah (Kementerian PUPR Dirjen Bina Marga, 2017). tetapi mereka harus tetap mempertimbangkan umur panjang dan ramah lingkungan selama masa pakai proyek jalan (Asphalt Pavement Alliance, 2010). Mempertimbangkan keberlanjutan dalam konstruksi perkerasan, sangat penting untuk mengetahui jenis perkerasan mana yang mengkonsumsi energi lebih sedikit, memiliki tingkat emisi lebih sedikit, yang ujungnya dengan kerusakan lingkungan lebih sedikit serta menjaga keseimbangan ekologis. Mempertimbangkan daur ulang juga merupakan faktor yang penting, telah ada beberapa studi kasus untuk menghitung energi yang terkandung dari kedua jenis perkerasan ini termasuk implikasi lingkungan yang ditimbulkan pada tahap penawaran proyek konstruksi, dengan tujuan untuk membandingkan, mengevaluasi, dan menetapkan mana yang lebih tinggi dalam hal efisiensi energi dan lebih rendah dampak lingkungannya (Kaushika and Kaushik, 2018).

## 2.2. Jenis Perkerasan Jalan

Jalan dirancang dengan membangun beberapa lapisan yang meliputi lapisan tanah dasar, lapisan bawah tanah, lapisan dasar, dan permukaan. Seluruh lapisan ini bersama-sama membentuk perkerasan jalan. Perkerasan jalan dapat dibuat menggunakan berbagai jenis bahan dan campuran, termasuk kerikil, batu, aspal, beton, atau tanah yang lebih baik. Pemilihan jenis bahan dan ketebalan lapisan perkerasan disesuaikan dengan perkiraan kepadatan lalu lintas yang akan melintasi jalan tersebut. Terdapat 3 jenis utama perkerasan jalan, yakni: fleksibel/lentur (perkerasan aspal), rigid/kaku (perkerasan semen Portland), dan komposit (lapisan lentur dan kaku dalam perkerasan yang sama), seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.1.



**Gambar 2. 1 Jenis Perkerasan Jalan** (Thives and Ghisi, 2017)

Perkerasan jalan adalah struktur yang terdiri dari lapisan tertutup dari bahan olahan yang ditempatkan di atas tanah dasar alami, dengan fungsi utama mendistribusikan muatan kendaraan ke tanah dasar (*subgrade*). Ada dua kelompok utama jenis perkerasan jalan, yaitu perkerasan lentur dan kaku, serta kombinasi keduanya yang menghasilkan perkerasan komposit.

Perkerasan lentur adalah perkerasan jalan yang permukaannya dilapisi oleh material aspal, baik itu dalam bentuk lapisan perkerasan pada permukaan maupun aspal campuran panas. Pada perkerasan lentur, semua struktur perkerasan melengkung akibat beban lalu lintas. Sementara itu, perkerasan kaku terdiri dari beton semen Portland dan secara substansial lebih kaku daripada perkerasan lentur karena modulus elastisitasnya yang tinggi. Perkerasan aspal atau perkerasan lentur terdiri dari struktur jalan di atas tingkat formasi yang mencakup material tidak terikat dan terikat aspal. Secara umum, perkerasan terdiri dari beberapa lapisan, seperti lapisan aspal campuran panas, *unbound road base*, *unbound subbase*, dan *subgrade*. Sementara struktur perkerasan kaku terdiri dari jalan permukaan beton semen hidrolik, *underlying base*, dan jika diperlukan, *subbase courses* (Thives and Ghisi, 2017).

Di Indonesia desain perkerasan jalan menggunakan Manual Desain Perkerasan Jalan Revisi 2017 dan lapisan perkerasannya, dengan enam Kebijakan Desain, dimana desain yang baik harus memenuhi kriteria-kriteria (Kementerian PUPR Dirjen Bina Marga, 2017) sebagai berikut:

1. menjamin tercapainya tingkat layanan jalan sesuai umur rencana;
2. merupakan *discounted-life-cycle cost* yang terendah;
3. mempertimbangkan kemudahan pelaksanaan dan pemeliharaan;
4. menggunakan material secara efisien dan memanfaatkan material lokal semaksimal mungkin;
5. mempertimbangkan faktor keselamatan jalan;
6. mempertimbangkan kelestarian lingkungan.

### **2.2.1. Struktur Perkerasan Lentur**

Struktur perkerasan lentur terdiri dari beberapa macam lapisan diatas tanah dasar yang dipadatkan, lapisan-lapisan tersebut berfungsi untuk menerima beban lalu lintas

kemudian menyebarkannya ke lapisan di bawahnya (AASHTO, 1993; Sukirman, 1999 dan Saodang, 2005), lapisan tersebut adalah :

1. Lapisan permukaan (*surface course*)

Lapisan paling atas dari perkerasan jalan disebut sebagai lapisan permukaan. Fungsinya adalah sebagai lapisan perkerasan yang menahan beban roda, lapisan yang kedap air, lapisan aus (*wearing course*), serta lapisan yang mendistribusikan beban ke lapisan di bawahnya.

2. Lapisan pondasi atas (*base course*)

Lapisan perkerasan yang berada di antara pondasi bawah dan lapisan permukaan disebut sebagai lapisan pondasi atas atau *base course*. Fungsi dari lapisan ini antara lain sebagai lapisan yang menahan gaya lintang dari beban roda, mendistribusikan beban ke lapisan di bawahnya, serta berfungsi sebagai lapisan peresapan dan bantalan untuk lapisan permukaan.

3. Lapisan pondasi bawah (*subbase course*)

Lapisan perkerasan yang berada antara lapisan pondasi atas dan tanah dasar disebut sebagai lapisan pondasi bawah atau *subbase course*. Fungsi lapisan ini adalah sebagai bagian dari konstruksi perkerasan yang bertujuan untuk mendistribusikan beban roda ke tanah dasar, mengoptimalkan penggunaan material, mengurangi ketebalan lapisan di atasnya yang lebih mahal, serta berfungsi sebagai lapisan peresapan agar air tanah tidak menggenang di bawah pondasi. Lapisan ini juga berperan sebagai lapisan pertama dalam memastikan kelancaran konstruksi dan mencegah partikel-partikel halus dari tanah dasar naik ke lapisan pondasi atas.

4. Lapisan tanah dasar (*subgrade*)

Lapisan tanah dengan ketebalan sekitar 50-100 cm di atasnya lapisan pondasi bawah dikenal sebagai lapisan tanah dasar atau *subgrade*. Lapisan tanah dasar ini dapat berupa tanah asli yang dipadatkan jika kondisinya baik, tanah yang dibawa dari tempat lain dan dipadatkan, atau tanah yang distabilisasi dengan kapur atau bahan lainnya. Lapisan tanah dasar dapat dibedakan menjadi beberapa jenis berdasarkan kondisi tanah asli, antara lain tanah galian, tanah timbunan, dan tanah asli. Berikut gambar ini jenis perkerasan lentur menurut Manual Desain Perkerasan Jalan Revisi 2017 dan lapisan perkerasannya (Kementerian PUPR Dirjen Bina

Marga, 2017). Tipikal struktur perkerasan dapat dilihat pada Gambar 2.2a, 2.2b, dan 2.2c sebagai berikut:



**Gambar 2. 2a Perkerasan Lentur pada Permukaan Tanah Asli (*At Grade*)**



**Gambar 2. 2b Perkerasan Lentur pada Tanah Timbunan**



**Gambar 2. 2c Perkerasan Lentur pada Tanah Galian**

### 2.2.2. Struktur Perkerasan Kaku

Perkerasan jalan yang menggunakan struktur perkerasan kaku, juga dikenal sebagai perkerasan jalan beton, digunakan dalam kondisi tanah dasar yang memiliki daya dukung yang rendah (misalnya sekitar 2%) atau ketika harus melayani beban lalu lintas yang cukup besar. Dalam kasus ini, solusinya adalah menggunakan konstruksi perkerasan kaku. Struktur perkerasan kaku terdiri dari pelat beton yang ditempatkan di atas lapisan pondasi bawah dan didukung oleh tanah dasar, dengan atau tanpa lapisan permukaan aspal di atasnya. Perbedaannya dengan perkerasan lentur adalah bahwa pada perkerasan kaku, beban lalu lintas sepenuhnya ditanggung oleh pelat beton, sedangkan beban yang diterima oleh tanah dasar relatif kecil (Saodang, 2005). Berikut gambar ini jenis perkerasan kaku menurut Manual Desain Perkerasan Jalan Revisi 2017 dan lapisan perkerasannya (Kementerian PUPR Dirjen Bina Marga, 2017). Tipikal struktur perkerasan dapat dilihat pada Gambar 2.3a, 2.3b, dan 2.3c sebagai berikut:



Gambar 2. 3a Perkerasan Kaku pada Permukaan Tanah Asli (*At Grade*)



Gambar 2.3b Perkerasan Kaku pada Tanah Timbunan



**Gambar 2.3c Perkerasan Kaku pada Tanah Galian**

Diperlukan kehati-hatian dalam merancang perkerasan kaku di atas tanah lunak atau daerah lain yang berpotensi menyebabkan pergerakan struktur yang tidak merata. Untuk daerah tersebut, perkerasan lentur lebih ekonomis karena perkerasan kaku memerlukan fondasi jalan yang lebih tebal dan penulangan.

Keuntungan dari penggunaan perkerasan kaku meliputi:

- Struktur perkerasan yang lebih tipis, kecuali untuk daerah dengan tanah lunak.
- Pelaksanaan konstruksi dan kontrol mutu yang lebih mudah.
- Biaya pemeliharaan yang lebih rendah jika pelaksanaan dengan baik.
- Proses pembuatan campuran yang lebih sederhana.

Namun, terdapat beberapa kerugian dalam penggunaan perkerasan kaku, antara lain:

- Biaya konstruksi yang lebih tinggi untuk jalan dengan lalu lintas rendah.
- Rentan terhadap retak jika dibangun di atas tanah lunak, kurang memiliki daya dukung yang memadai, atau jika pelaksanaannya tidak baik (mutu pelaksanaan rendah).
- Secara umum, memberikan kenyamanan berkendara yang lebih rendah.

Pada perkerasan kaku, daya tahan terhadap beban lalu lintas diukur oleh ketahanan tarik lentur beton (Division of Maintenance Pavement Program, 2015). Penggunaan tulangan pada perkerasan kaku bertujuan untuk mengendalikan terjadinya retakan, bukan untuk menanggung beban lalu lintas (Zollinger et al., 1998; FHWA, 2006). Perkerasan kaku dapat mengalami penyusutan selama proses pengerasan beton, serta ekspansi dan kontraksi karena perubahan suhu, oleh karena itu, pergerakan ini perlu dipertimbangkan (Transportation Research Circular E-C107, 2006). Terdapat 5 jenis perkerasan kaku yang dikenal (Force, 1992), yaitu:

a. Perkerasan kaku bersambung tanpa tulangan (*jointed unreinforced/ plain concrete pavement*)

Perkerasan jenis ini adalah varian umum dalam jenis perkerasan kaku yang memiliki biaya pelaksanaan lebih rendah dibandingkan dengan varian lainnya. Di wilayah-wilayah di mana korosi pada sambungan tulangan menjadi isu kritis, penggunaan perkerasan tanpa sambungan tulangan mengatasi masalah tersebut, meskipun besi ruji (*dowel*) masih dapat terkena dampak dari korosi. Perluasan dan kontraksi pada perkerasan diatasi dengan menggunakan sambungan. Secara umum, sambungan ekspansi biasanya ditempatkan setiap 3,6 hingga 6 meter (di Indonesia, biasanya antara 4,5 hingga 5 meter). Sambungan ini ditempatkan cukup dekat satu sama lain sehingga retakan tidak akan muncul di dalam pelat perkerasan hingga mencapai akhir masa pakai perkerasan. Tidak terdapat penguatan tambahan pada pelat perkerasan ini, kecuali penambahan besi ruji (*dowel*) pada sambungan ekspansi dan batang pengikat (*tie bar*) pada sambungan longitudinal. *Dowel* ditempatkan di setiap sambungan melintang dengan tujuan sebagai sistem pengalir beban, sehingga pelat yang berdekatan dapat berfungsi bersama-sama tanpa perbedaan yang signifikan dalam penurunan. Di sisi lain, *tie bar* dipasang pada sambungan memanjang untuk mengikat pelat agar tidak bergeser secara horizontal.

b. Perkerasan kaku bersambung dengan tulangan (*jointed reinforced concrete pavement*)

Perkerasan jenis ini memiliki pelat yang lebih besar dan penambahan penguatan tambahan. Sambungan umumnya terletak pada jarak antara 7,5 hingga 12 meter. Biasanya, persentase penguatan dalam arah memanjang berkisar antara 0,1% hingga 0,2% dari luas penampang melintang beton, sementara penguatan dalam arah melintang lebih rendah. Penguatan pada jenis perkerasan ini bukan untuk tujuan struktural, melainkan untuk mempertahankan kepadatan retakan dan mencegah pergeseran sepanjang bidang retakan. Perkerasan kaku bersambung yang diperkuat dengan *dowel* ini masih menggunakan *dowel*. Karena pelatnya lebih panjang, namun retakan tetap terjadi pada jarak yang sama, ada kemungkinan terdapat satu atau dua retakan pada pelat. Kelebihan dari perkerasan kaku yang diperkuat dengan *dowel* adalah jumlah sambungan yang lebih sedikit, meskipun

biayanya lebih tinggi karena penggunaan dowel, kinerja sambungan yang kurang optimal, dan kemungkinan adanya retakan pada pelat.

c. Perkerasan kaku menerus dengan tulangan (*continuously reinforced concrete pavement*)

Perkerasan tipe ini adalah pelat dengan penguatan yang cukup padat dan tanpa sambungan ekspansi. Biasanya, jumlah penguatan dalam arah memanjang berkisar antara 0,6% hingga 0,8% dari luas penampang melintang beton, sementara jumlah penguatan dalam arah melintang lebih sedikit daripada dalam arah memanjang. Jika jumlah penguatan kurang dari 0,6%, maka risiko terjadinya kerusakan punch out akan meningkat. Retak rambut dapat muncul dalam jenis perkerasan ini, tetapi tidak memengaruhi kinerjanya secara signifikan. Retakan ini memiliki karakteristik berupa sejumlah retakan dengan jarak antara 0,6 hingga 2,4 meter. Keberadaan retakan ini dijaga oleh penguatan yang ada, memungkinkan agregat untuk tetap terkunci satu sama lain dan memfasilitasi distribusi gaya geser. Namun, jika interlocking agregat tidak dijaga, perkerasan bisa mengalami kerusakan punch out di tepinya, yang sering terjadi pada perkerasan kaku berkontinuitas dengan penguatan. Perkerasan jenis ini membutuhkan penahanan pada ujungnya pada tahap awal dan akhir untuk mengatasi kontraksi akibat penyusutan serta untuk membantu pengembangan retakan sesuai dengan yang diinginkan. Perkerasan kaku menerus yang diperkuat memberikan pengalaman berkendara yang lebih nyaman karena permukaannya lebih halus dan memiliki umur yang lebih panjang dibandingkan dengan jenis perkerasan lainnya. Meskipun biaya pembuatannya lebih tinggi dibandingkan dengan perkerasan bersegmen, hal ini disebabkan oleh penggunaan penguatan yang lebih besar. Namun, dari segi finansial, ini lebih efisien untuk jalan dengan lalu lintas tinggi karena memiliki kinerja jangka panjang yang lebih baik dibandingkan dengan jenis perkerasan kaku lainnya.

d. Perkerasan beton semen prategang (*prestressed concrete pavement*)

Potensi perkerasan kaku yang diperkuat prategang berkaitan dengan berbagai aspek berikut: penggunaan bahan yang lebih efisien, jumlah sambungan yang diperlukan yang lebih sedikit, serta kemungkinan retakan yang lebih rendah. Ini menghasilkan

biaya pemeliharaan yang lebih rendah dan masa pakai perkerasan yang lebih panjang. Dalam perkerasan kaku konvensional, batasan tegangan yang muncul akibat beban roda didasarkan pada kuat tarik lentur beton, dan tebal perkerasan ditentukan oleh batasan tegangan tarik yang dihasilkan oleh beban roda. Oleh karena itu, volume beton antara lapisan atas dan bawah pelat tidak dimaksimalkan untuk menahan tegangan yang muncul akibat beban roda, yang pada akhirnya mengakibatkan penggunaan bahan konstruksi yang tidak efisien. Namun, dalam perkerasan beton yang diperkuat prategang, kuat tarik lentur beton ditingkatkan dengan memberikan tegangan tekan, dan tidak lagi dibatasi oleh kuat tarik lentur beton itu sendiri. Akibatnya, ketebalan perkerasan kaku yang diperlukan untuk menahan beban tertentu dapat menjadi lebih tipis, yaitu sekitar 40% hingga 50% lebih tipis dibandingkan dengan perkerasan kaku konvensional.

e. Perkerasan beton semen pracetak (dengan maupun tanpa prategang)

Menggunakan perkerasan kaku pracetak memiliki sejumlah keunggulan, termasuk pemeliharaan kualitas beton sesuai rencana, dampak cuaca yang minim, dan gangguan yang terbatas pada lalu lintas selama pelaksanaan. Perkerasan kaku pracetak dapat dibagi menjadi dua jenis, yaitu yang menggunakan prategang dan yang tidak. Pada salah satu jenis perkerasan kaku pracetak prategang, ketebalan pelat 20 cm setara dengan ketebalan perkerasan kaku konvensional 35,5 cm. Pada perkerasan kaku pracetak prategang, terdapat tiga jenis pelat yang digunakan: joint panel (terletak di ujung masing-masing bagian rangkaian pelat prategang dan memiliki ruji pada sambungannya untuk mengakomodasi pergerakan horizontal pelat), central panel (terletak di tengah rangkaian pelat dengan lubang atau pocket untuk penempatan ujung *post tension*), dan strand base panel (pelat yang terletak di antara joint panel dan central panel). Dalam satu tahap pekerjaan, setidaknya harus dilakukan satu segmen yang mencakup susunan pelat dari joint panel ke joint panel berikutnya. Pelat ini ditempatkan di atas lapisan pondasi yang sudah disiapkan dan rata, dan pada kedua sisinya dilengkapi dengan lidah-alur (*shear key*) yang mengatur pergerakan vertikal selama pelaksanaan dan memastikan kenyamanan pengendara untuk mencegah terjadinya "*faulting*".

Perkerasan kaku a, b, dan c masuk dalam kategori perkerasan kaku konvensional, di mana perencanaan dan detail sambungan sangat krusial untuk jenis perkerasan tersebut. Ketiga varian perkerasan konvensional ini dapat diaplikasikan untuk proses pelapisan ulang (overlay), meskipun biasanya yang paling sering digunakan adalah perkerasan kaku bersambung tanpa tulangan (FAA, 2021).

### **2.3. Pemeliharaan dan Rehabilitasi Jalan**

Menurut Prosedur Pemeliharaan Jalan (SOP/UPM/DJBM-12) yang dikeluarkan oleh Dirjen Bina Marga Kementerian PUPR (Direktorat Jenderal Bina Marga Kementerian Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat, 2016), pengertian dari :

1. Pemeliharaan jalan :

Penanganan jalan melibatkan serangkaian kegiatan seperti pencegahan, perawatan, dan perbaikan yang diperlukan untuk menjaga kondisi jalan agar tetap optimal dalam melayani lalu lintas dan mencapai usia rencana yang ditetapkan.

2. Pemeliharaan berkala jalan :

Penanganan pencegahan dilakukan untuk mencegah terjadinya kerusakan yang lebih luas dan menangani setiap kerusakan yang telah diprediksi dalam desain agar kondisi kestabilan tetap sesuai dengan rencana.

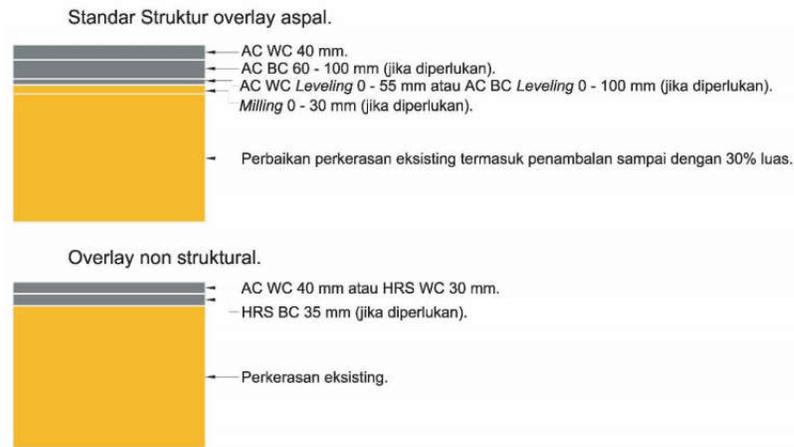
Desain untuk rehabilitasi dan rekonstruksi pekerjaan jalan dalam Manual Desain Perkerasan Jalan 2017 (Kementerian PUPR Dirjen Bina Marga, 2017), mencakup :

- *overlay* struktural
- *overlay* non struktural,
- daur ulang perkerasan (*recycling*),
- stabilisasi dengan *foam bitumen*,
- stabilisasi dengan semen

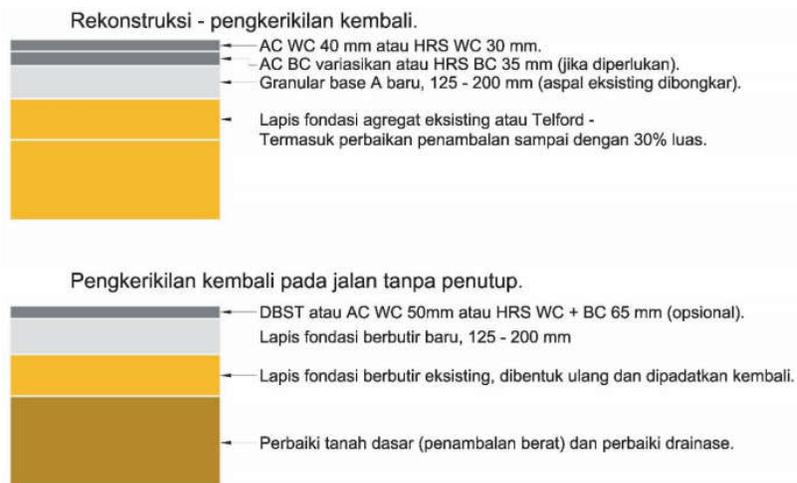
Manual ini merupakan pelengkap pedoman desain perkerasan Pd T-01-2002-B, Pd T-05-2005 dan Pedoman Interim No.002/P/BM/2011, dengan penajaman pada aspek-aspek sebagai berikut:

- a) pencapaian tingkat pelayanan;
- b) penggunaan material yang efisien.
- c) pertimbangan kepraktisan pelaksanaan;

- d) penerapan analisis biaya siklus pelayanan selama periode analisis keekonomian (*discounted life cycle cost*). Berikut ini tipikal penanganan rehabilitasi struktur perkerasan seperti yang dapat dilihat pada Gambar 2.4a., 2.4b dan 2.4c.



**Gambar 2. 4a Rehabilitasi Struktur Perkerasan dengan Overlay**



**Gambar 2. 4b Rehabilitasi Struktur Perkerasan dengan Rekonstruksi**



**Gambar 2. 4c Rehabilitasi Struktur Perkerasan dengan Daur Ulang**

## 2.4. Pengertian Energi

Bangunan memiliki hubungan dengan dua jenis konsumsi energi, yaitu energi tertanam dan energi operasional. Energi tertanam (*embodied energy*) mencakup semua energi yang digunakan sebelum tahap operasional bangunan, seperti energi yang digunakan selama proses pembuatan, transportasi, dan konstruksi bahan bangunan (Zhang et al., 2018). Energi operasional mencakup konsumsi energi untuk pengoperasian bangunan (misalnya pemanasan dan pendinginan) (Schmidt and Crawford, 2018). Menurut Dixit et al., (2010) total energi siklus hidup suatu bangunan mencakup energi yang diwujudkan dan energi pengoperasian:

- 1) Energi yang terkandung (*Embodied Energy/EE*): Energi yang dibutuhkan dalam bahan bangunan selama seluruh proses produksi, konstruksi di lokasi, pembongkaran, dan pembuangan akhir;
- 2) Energi pengoperasian (*Operational Energy/OE*): Energi yang digunakan untuk menjaga kenyamanan lingkungan melalui proses seperti pemanasan dan pendinginan, pencahayaan, dan operasional peralatan.

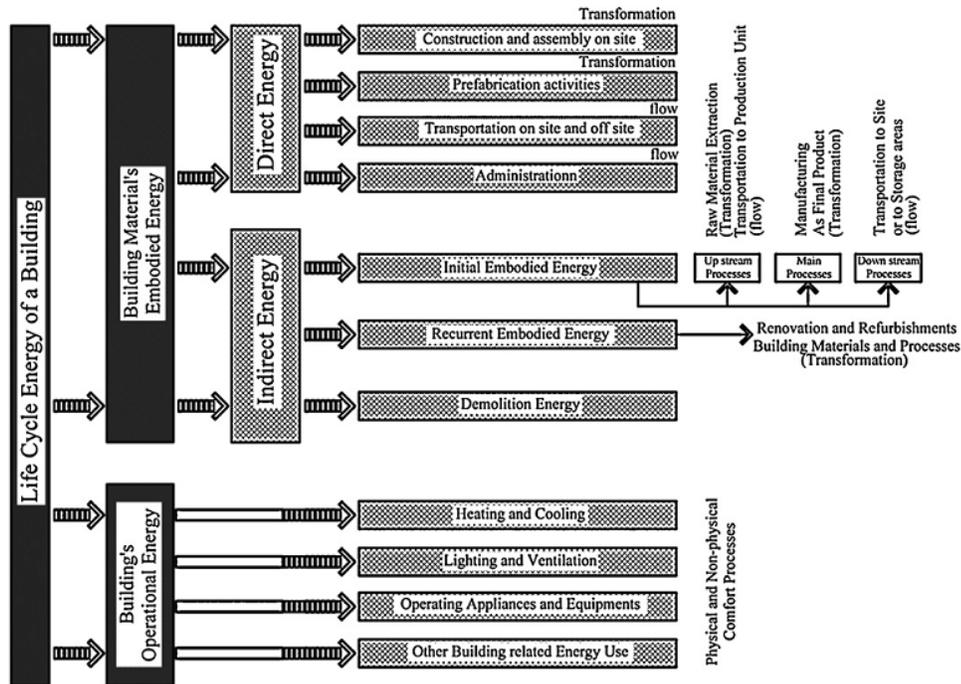
### 2.4.1. Energi Terkandung (*Embodied Energy*)

Menurut Crowther, (1999) energi tertanam (*embodied energy*) dapat didefinisikan sebagai total energi yang dibutuhkan dalam proses pembuatan bangunan, termasuk energi yang langsung digunakan dalam konstruksi dan perakitan, serta energi tidak langsung yang diperlukan untuk memproduksi bahan dan komponen bangunan. Cole dan Kernan (1996) dalam Ding (2004) menjelaskan bahwa energi yang terkandung mencakup energi yang diperlukan untuk ekstraksi dan pemrosesan bahan baku, transportasi bahan baku, pembuatan bahan bangunan dan komponen, serta energi yang digunakan dalam berbagai proses selama konstruksi dan pembongkaran bangunan (Dixit et al., 2010; Dixit et al., 2014; Habash, 2022). Istilah energi yang terkandung merujuk pada total energi yang tertanam dalam produk yang diproduksi melalui berbagai produk dan proses yang digunakan dalam pembuatan, pemeliharaan, dan pembuangan (Dixit, 2019a).

Secara keseluruhan, bangunan menggunakan dua jenis konsumsi energi seperti yang terlihat pada Gambar 2.5, mulai dari ekstraksi bahan baku hingga dekonstruksi dan pembuangan (Dixit et al., 2010; Dixit et al., 2012) yaitu:

1. Energi langsung (*direct energy*)

Energi langsung dikonsumsi dalam berbagai operasi baik di lokasi maupun di luar lokasi, seperti konstruksi, prefabrikasi, transportasi, dan administrasi (Dixit *et al.*, 2010; Dixit *et al.*, 2012). Energi langsung yang terkandung dalam bangunan mencakup semua energi yang digunakan secara langsung dalam semua proses konstruksi, transportasi, manajemen di tempat dan di luar lokasi, serta energi yang terwujud secara langsung, terutama terkait dengan tahap konstruksi. Sebagian besar energi langsung dikonsumsi dalam pengelolaan di lokasi, operasional peralatan dan alat konstruksi, serta transportasi tenaga kerja, material, dan peralatan konstruksi ke lokasi kerja (Dixit *et al.*, 2012; Dixit, 2017).



Gambar 2. 5 Pemodelan *Embodied Energy*  
(Dixit et al., 2010)

2. Energi tidak langsung (*indirect energy*)

Sebagian besar energi tidak langsung digunakan selama pembuatan bahan bangunan, baik dalam proses utama, proses awal, dan proses akhir, serta selama renovasi, perbaikan, dan pembongkaran (Dixit *et al.*, 2010; Dixit *et al.*, 2012). Energi tidak langsung ini dikonsumsi melalui penggunaan bahan, proses perakitan,

peralatan, dan sebagainya. Ketika dipasang di bangunan, masing-masing komponen juga menghabiskan energi selama pembuatan dan pengiriman ke lokasi kerja. Energi dikonsumsi dalam pembuatan bahan bangunan, proses renovasi, perbaikan, dan pembongkaran bangunan. Ini mencakup energi awal yang diwujudkan, energi yang terus berulang, dan energi yang dikeluarkan saat pembongkaran. Energi awal yang diwujudkan dikonsumsi selama produksi bahan dan komponen, termasuk pengadaan bahan baku, pembuatan bahan bangunan, dan pengiriman produk jadi (transportasi) ke lokasi konstruksi. Energi yang berulang digunakan selama perawatan dan proses perbaikan yang dilakukan selama masa pemakaian bangunan. Energi pembongkaran dikeluarkan dalam proses dekonstruksi dan pembuangan bahan bangunan (Dixit *et al.*, 2012; Dixit, 2017).

#### **2.4.2. Energi Operasional**

Energi digunakan untuk menjaga kondisi lingkungan di dalam gedung melalui pemanasan, pendinginan, penerangan, dan pengoperasian peralatan (Dixit *et al.*, 2012). Energi operasional didefinisikan sebagai energi yang digunakan setelah konstruksi selesai dan gedung mulai ditempati (Iddon and Firth, 2013). Dalam konteks gedung, energi operasional digunakan untuk pengaturan suhu ruangan, pemanasan, pencahayaan, dan penggunaan peralatan (Dixit, 2017). Energi operasional termasuk beban energi untuk pemanasan, pendinginan, pencahayaan, pasokan listrik, dan penggunaan peralatan yang meningkat selama masa pakai gedung (Zeng and Chini, 2017). Untuk mengoptimalkan konservasi energi operasional, digunakan peralatan yang efisien energi dan bahan isolasi yang canggih (Dixit *et al.*, 2010). Pada jalan tol, periode operasional yang lebih panjang dan beragam mengonsumsi lebih banyak energi daripada periode konstruksi dan daur ulang, sehingga perlu mempelajari konsumsi energi selama periode ini untuk evaluasi konsumsi energi yang terkait dengan transportasi (Li and Wang, 2016).

#### **2.5. Pengertian Emisi**

Emisi konstruksi dan karbon yang terkandung adalah dua jenis emisi yang umumnya dikaitkan dengan pekerjaan konstruksi. Emisi konstruksi mengacu pada emisi gas buang yang dihasilkan dari penggunaan mesin pembakaran internal yang terkait dengan

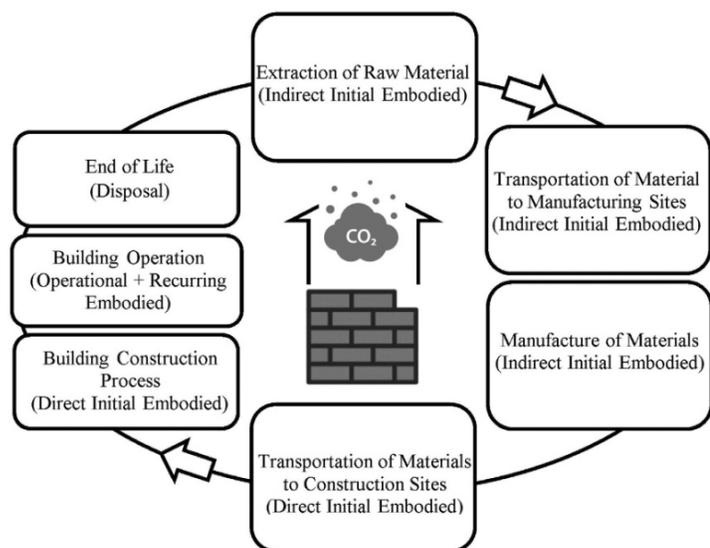
aktivitas konstruksi, sedangkan karbon yang terkandung (*embodied carbon*) mengacu pada jumlah semua emisi gas rumah kaca yang dihasilkan dari siklus hidup konstruksi bangunan (Fan and Fu, 2016; Arogundade et al., 2023), seperti dapat dilihat pada Gambar 2.6, berikut penjelasannya:

1. Emisi konstruksi

Emisi konstruksi mengacu pada emisi gas buang yang dihasilkan dari penggunaan mesin pembakaran internal yang terkait dengan aktivitas konstruksi, yang berada di bawah kendali kontraktor konstruksi. Contoh emisi konstruksi termasuk debu, yang dapat sangat bervariasi dari hari ke hari, tergantung pada tingkat aktivitas, jenis operasi tertentu, dan kondisi cuaca yang berlaku. Emisi konstruksi harus dilakukan secara bertahap dan terjadwal untuk menghindari puncak emisi dan dihentikan selama peringatan kabut asap tahap kedua (Sizirici et al., 2021).

2. *Embodied carbon* (emisi karbon)

Karbon yang terkandung adalah jumlah semua emisi gas rumah kaca (sebagian besar karbon) yang dihasilkan dari siklus hidup konstruksi bangunan (Wang, Jiang, et al., 2023). Hal ini mencakup emisi dari ekstraksi dan transportasi material, tahap konstruksi, menjaga operasional bangunan (seperti perbaikan), dan pada akhirnya tahap akhir masa pakai melalui pembongkaran dan pembuangan atau pemrosesan material (Alotaibi et al., 2022).



**Gambar 2. 6 Energi dan Karbon yang Terkandung (*Embodied*) Selama Tahap Siklus Hidup Bangunan (Habash, 2022)**

## 2.6. Penelitian tentang Energi dan Emisi pada Proyek Jalan

Penelitian tentang penggunaan energi pada bidang konstruksi lebih banyak berfokus tentang energi pada bangunan gedung, baik pada *embodied energy*, *operational energy*, *recurrent energy*, dan *decommissioning energy*. Seperti yang dilakukan oleh Manish Kumar Dixit, (2019), Zeng and Chini, (2017), Dixit et al., (2015), Dixit et al., (2013), yang melakukan penelitian tentang perhitungan dan model *embodied energy*. Kemudian Tarabieh and Khorshed, (2019) melakukan penelitian dengan mengoptimalkan metode evaluasi untuk energi terwujud dan manajemen karbon dari bangunan yang ada di Mesir. Mourão et al., (2019) menghitung dan menggabungkan energi yang diwujudkan dan energi operasional menghitung dan menggabungkan energi yang terkandung dan operasional. Taffese and Abegaz, (2019) mengidentifikasi lima besar bahan konstruksi yang paling banyak digunakan (semen, pasir, kerikil kasar, blok beton berlubang, dan batang tulangan), yang juga merupakan sumber utama timbulan limbah selama konstruksi bangunan di Ethiopia. Schmidt and Crawford, (2018) membuat kerangka kerja untuk optimalisasi terintegrasi dari siklus hidup emisi gas rumah kaca dan biaya bangunan. Relatif sedikit yang membahas penggunaan energi pada pekerjaan jalan, terutama bagaimana metode perhitungan energi yang praktis, sehingga didapatkan cara mengestimasi besarnya energi perkerasan jalan pada tahap perencanaan, hingga dapat diketahui perkerasan mana yang paling rendah energinya dengan cara yang mudah dan terintegrasi dengan perhitungan biaya.

Penggunaan energi dalam proyek konstruksi akan menghasilkan CO<sub>2</sub> yang berkontribusi pada emisi gas rumah kaca, sebagai indikator dampak lingkungan dari bahan dan sistem konstruksi secara keseluruhan. Proyek konstruksi bertanggung jawab atas penggunaan sekitar 40% energi global, 40% sumber daya global yang dipancarkan ke atmosfer, dan 1/3 dari total emisi gas rumah kaca di dunia (Wong and Zhou, 2015). Dalam konstruksi perkerasan, aspal dan semen adalah dua bahan yang paling umum digunakan (Zhang, Lepech, et al., 2010). Sekitar 83% dari jalan terbuat dari jenis yang fleksibel (permukaan yang memakai aspal), 7% adalah tipe kaku (jalan beton semen Portland dengan atau tanpa permukaan yang memakai aspal), dan hampir 10% dari tipe komposit seperti permukaan aspal pada dasar beton semen Portland (Mazumder et al., 2016).

Optimalisasi energi dan emisi yang terintegrasi mulai dari fase inisiasi, desain, konstruksi dan operasional dan pemeliharaan hingga *end of life* pada proyek infrastruktur jalan belum banyak dilakukan, beberapa penelitian tersebut seperti:

- Menyelidiki rangkaian lengkap titik pengoperasian mesin, dengan mempertimbangkan konsumsi bahan bakar dan peta emisi untuk memodelkan efisiensi bahan bakar dan tingkat emisi secara akurat dalam kondisi kerja yang berbeda, sehingga menghasilkan model optimasi gabungan konsumsi dan emisi bahan bakar menggunakan algoritma genetika pemrograman integer yang dikembangkan untuk alat berat konstruksi pada tahap pelaksanaan konstruksi (Masih-Tehrani et al., 2020).
- Mengusulkan suatu metodologi untuk mengoptimalkan profil longitudinal jalan dalam kerangka desain ramah lingkungan menurut kriteria konsumsi energi atau kriteria potensi pemanasan global, menggunakan simulasi lalu lintas yang didasarkan pada model dinamis kendaraan yang dihitung untuk tahap konstruksi dan operasi (Vandanjon et al., 2019).
- Melakukan kuantifikasi konsumsi energi dan emisi karbon dioksida selama operasi *excavator* (Jassim et al., 2019), menentukan dampak lingkungan dari pengangkutan material dengan *wheel loader* selama operasi pemindahan tanah untuk memberikan panduan yang lebih baik bagi praktisi selama tahap perencanaan awal proyek konstruksi (Jassim et al., 2019) dan mengembangkan model yang efisien yang mampu menilai penggunaan energi dan emisi CO<sub>2</sub> dari truk non-jalan raya dengan menggunakan model ANN pada tahap perencanaan awal (Jassim et al., 2018b).
- Melakukan optimalisasi campuran beton untuk perkerasan jalan, dengan rekayasa material baru yang berkelanjutan dengan percobaan di laboratorium, dengan tujuan utama untuk melestarikan sumber daya alam dan mencapai penghematan energi pada tahap konstruksi (Barišić et al., 2017).
- Melakukan optimalisasi prosedur pembuatan aditif campuran hangat cairan karet aspal modifikasi, dengan percobaan di laboratorium untuk penghematan energi dan pengurangan emisi yang lebih banyak pada tahap konstruksi (Yu et al., 2017).
- Melakukan optimalisasi pola mengemudi peralatan konstruksi di jalan raya sehingga meminimalkan jumlah emisi yang dihasilkan per jarak tempuh dengan mengembangkan skema pengurangan emisi tingkat operasi menggunakan *engine*

*load model* pada tahap pelaksanaan untuk peralatan konstruksi di jalan raya (Barati and Shen, 2017).

- Menggunakan alat pengoptimalan multi-tujuan heuristik untuk mengembangkan dan mendesain program pemeliharaan berkelanjutan yang optimal untuk alat berat dengan memaksimalkan keefektifan jaringan jangka panjang sambil meminimalkan emisi gas rumah kaca yang diperoleh dari penerapan perlakuan pada tahap pemeliharaan (Torres-Machi et al., 2017).
- Mengoptimalkan multi-tujuan emisi gas rumah kaca dalam proyek konstruksi jalan raya menggunakan pemodelan sistem konstruksi dan penilaian siklus hidup, dengan menggunakan studi kasus pada pelaksanaan konstruksi jalan raya (Ozcan-Deniz and Zhu, 2017).
- Menentukan alternatif konstruksi perkerasan yang optimal untuk meminimalkan biaya siklus hidup dan emisi gas rumah kaca dengan membuat strategi desain perkerasan jalan umur panjang berdasarkan prinsip-prinsip keberlanjutan, khususnya biaya dan emisi gas rumah kaca. Model optimasi menggunakan *life cycle cost analysis* (LCCA) untuk evaluasi ekonomi dan *life cycle assessment* untuk evaluasi lingkungan yang dilakukan pada tahap desain (Wang and Chong, 2014).
- Mengembangkan kerangka kerja untuk estimasi emisi gas rumah kaca yang disebabkan oleh konstruksi perkerasan aspal selama tahap produksi material (bitumen dan agregat) dan tahap konstruksi (Kim et al., 2012a)
- Membuat kerangka kerja berdasarkan konsep akurasi kontrol untuk menentukan operasi konstruksi yang optimal ketika waktu, biaya, dan dampak lingkungan proyek dianggap sebagai tujuan proyek selama perencanaan proyek. Model untuk menentukan operasi konstruksi yang optimal menggunakan algoritma genetika penyortiran non-nominasi II, atau NSGA-II, dengan *software* MATLAB (Ozcan-Deniz et al., 2012).
- Membuat model optimasi siklus-hidup pada tahap pemeliharaan dan rehabilitasi, menggunakan teknik optimasi pemrograman dinamik, kemudian dikembangkan untuk menentukan strategi pelestarian yang optimal untuk sistem pelapisan perkerasan jalan dan untuk meminimalkan konsumsi energi siklus-hidup total, emisi gas rumah kaca, dan biaya dalam periode analisis (Zhang, et al., 2010).

- Membuat kerangka kerja terintegrasi dari simulasi-optimasi multi-tujuan untuk mengoptimalkan konfigurasi peralatan operasi pemindahan tanah. Kerangka yang diusulkan menggabungkan beberapa metodologi seperti simulasi, utilitas beberapa atribut, statistik dan optimisasi. Platform simulasi *Activity Object-Oriented Simulation* (AOOS) yang ada diadopsi untuk memodelkan operasi pemindahan tanah (Zhang, 2008).

Pada penelitian terdahulu untuk perhitungan energi dan emisi pada tahap pemeliharaan selama umur jalan, penentuan waktu pelaksanaan pemeliharaan/rehabilitasi jalan dilakukan dengan asumsi atau ditentukan, seperti yang dilakukan oleh: Loijos et al., (2013), Dumitrescu et al., (2014), Mazumder et al., (2016), Butt and Birgisson, (2016); Fraser and Chester, (2016); Boonpoke et al., (2018), Gulotta et al., (2019), Verán-Leigh et al., (2019), Sharifi et al., (2021), Krishna and Kumar, (2022), untuk penelitian ini akan dilakukan penentuan kapan waktu pelaksanaan pemeliharaan berdasarkan model prediksi nilai IRI, begitu nilai IRI maksimum yang disyaratkan terlampaui, maka itulah waktu pelaksanaan pemeliharaan. Dengan demikian diharapkan perhitungan energi, emisi dan biaya dalam batasan sistem *cradle to cradle* selama umur jalan menjadi lebih akurat dan optimal. Meskipun konsep ramah lingkungan dan keberlanjutan lingkungan telah ada dalam industri konstruksi selama bertahun-tahun, statistik resmi menunjukkan bahwa industri konstruksi terus menjadi konsumen energi utama (Wong and Zhou, 2015). Penelitian ini sangat penting untuk mendukung upaya penurunan energi dan emisi karbon pada proyek konstruksi selama siklus hidup proyek. Di seluruh dunia, telah diinisiasi komitmen untuk mengurangi dampak lingkungan akibat industri konstruksi melalui Kyoto Protocol pada tahun 1997. Pemerintah Indonesia juga telah berkomitmen untuk mengurangi pemanasan global dengan mengurangi emisi pada tahun 2020 (Wibowo et al., 2018).

Beberapa topik penelitian tentang energi dalam konteks jalan dan infrastruktur terkait perkerasan jalan telah menjadi fokus penelitian di berbagai negara. Para peneliti tersebut telah melakukan beragam studi untuk mengkaji aspek-aspek tertentu yang berkaitan dengan konsumsi energi dalam siklus hidup perkerasan jalan. Beberapa topik utama penelitian ini dapat dikelompokkan berdasarkan kesamaan tujuan dan metode yang digunakan adalah sebagai berikut:

- Penelitian yang berkaitan dengan analisis kebutuhan energi pada tahap produksi perkerasan jalan aspal. Ini termasuk menganalisis proses pencampuran aspal di *Asphalt Mixing Plant* (AMP) dengan jenis berbeda, seperti *continuous drum mixing* dan *batch-processing plant*, dengan kapasitas produksi yang berbeda pula (Ang et al., 1993). Selain itu, penelitian juga mencakup penghitungan energi menggunakan *Environmental Life Cycle Assessment* (EVE) untuk perkerasan beton dan aspal pada tahap produksi material, konstruksi, dan akhir masa pakai (Roudebush, 1996).
- Penelitian yang berfokus pada perhitungan energi dalam konteks dampak lingkungan yang dihasilkan oleh perkerasan jalan, baik pada tahap produksi maupun penggunaan, pemeliharaan, dan disposisi (Häkkinen and Mäkelä, 1996). Penelitian lainnya lebih menekankan perbandingan antara perkerasan kaku dan lentur dengan menggunakan metode *Life Cycle Assessment* (LCA) pada berbagai tahap siklus hidupnya (Horvath and Hendrickson, 1998).
- Penelitian yang membahas konsumsi energi dalam pekerjaan konstruksi jalan, termasuk perbandingan antara penggunaan material alam dan material bekas (*secondary product*) seperti *coal ash*, *crushed concrete waste*, dan *granulated blast-furnace slag* (Mroueh et al., 2000). Kelompok penelitian lainnya mengkaji konsumsi energi yang disebabkan oleh beban volume lalu lintas terhadap lapisan permukaan jalan, baik yang menggunakan lapisan aspal maupun lapisan beton (Stripple, 2001).
- Penelitian yang menggunakan metode *Life Cycle Assessment* (LCA) untuk menghitung energi akibat penggunaan material dan peralatan konstruksi perkerasan jalan dari produksi hingga penghancuran dan daur ulang (Park et al., 2003). Sementara itu, metode *hybrid* yang menggunakan tabel *input-output* nasional dari Australian Bureau of Statistics (ABS) digunakan dalam penelitian lain untuk menganalisis energi dalam siklus hidup berbagai jenis perkerasan seperti *continuously reinforce concrete* (CRC), *plain concrete* (PC), *full-depth asphalt* (FDA), dan lainnya (Treloar et al., 2004).
- Penelitian yang fokus pada konsumsi energi bahan dan konstruksi perkerasan aspal dan beton bertulang dengan menggunakan model SETAC-EPA untuk menilai penggunaan energi dari tahap ekstraksi bahan mentah hingga penghamparan di lokasi pekerjaan (Zapata and Gambatese, 2005). Kelompok penelitian lainnya mengkaji

*embodied energy* dan *global warming potential* dalam siklus hidup jalan dengan perkerasan beton dan aspal (Meil, 2006).

- Penelitian yang melibatkan evaluasi ekonomi dan lingkungan dengan menggunakan analisis *life cycle cost* pada perkerasan aspal dan beton (Chan, 2007), serta perbandingan konsumsi energi pada tahap pemeliharaan dan rehabilitasi berbagai teknik rehabilitasi perkerasan aspal, seperti daur ulang perkerasan, rekonstruksi, dan *overlay* (Thenoux et al., 2007). Selain itu, terdapat penelitian yang mengembangkan metode perhitungan untuk menilai penggunaan energi dari aspal campuran hangat (*Warm Mix Asphalt*) pada tahap produksi dan konstruksi (Zaumanis et al., 2012).
- Penelitian yang mengeksplorasi konsumsi energi pada tahap konstruksi perkerasan kaku dan lentur, dengan fokus khusus pada emisi gas rumah kaca yang diakibatkan oleh penggunaan peralatan konstruksi jalan (Kim et al., 2012b). Membuat model untuk menilai energi yang terkandung (*embodied energy*) dan emisi gas rumah kaca dalam proyek infrastruktur pada tahap produksi dan konstruksi (Krantz, Larsson, et al., 2015). Sebagai tambahan, ada upaya untuk membuat model *artificial neural network* (ANN) yang dapat memperkirakan konsumsi energi dalam produksi aspal campuran panas (Androjić and Alduk, 2016).
- Penelitian tentang berbagai metode telah digunakan untuk mengevaluasi konsumsi energi dan emisi CO<sub>2</sub> dari alat pengangkut massal pada berbagai tahapan, termasuk pekerjaan tanah (Jassim et al., 2016), analisis dekomposisi konsumsi energi untuk jalan bebas hambatan pada periode operasional jalan (Li and Wang, 2016), pengembangan model termodinamik serta validasi konsumsi energi pada proses produksi campuran aspal di AMP (Chong et al., 2016), perhitungan emisi dan konsumsi energi untuk campuran aspal panas (HMA), campuran aspal hangat (WMA), dan campuran aspal dingin (CMA) (Thives and Ghisi, 2017), analisis konsumsi energi dan emisi gas rumah kaca selama proses produksi dan konstruksi proyek jalan (Mulyana and Wirahadikusumah, 2017), serta perhitungan konsumsi energi dan dampak lingkungan dari perkerasan aspal karet (Wang et al., 2018).
- Penelitian yang menitikberatkan pada penghitungan emisi karbon dioksida (CO<sub>2</sub>) dalam pekerjaan preservasi perkerasan aspal pada tahap konstruksi dan tahap penggunaan, dengan fokus pada teknik seperti *thin overlay*, *chip seal*, dan *crack seal* (Wang et al., 2019). Selanjutnya, ada penelitian yang mengkaji konsumsi energi dan

memprediksi aspal campuran panas menggunakan analisis *kernel principal component analysis* dan *support vector machines* (Huang et al., 2019a).

- Terakhir, penelitian yang menentukan dampak faktor eksternal seperti kondisi cuaca, kadar air, dan suhu campuran mineral terhadap konsumsi energi dalam proses produksi aspal campuran panas, khususnya dalam *rotary dryer* (Androjić et al., 2020).

Semua penelitian ini bertujuan untuk meningkatkan pemahaman tentang efisiensi energi dan dampak lingkungan dalam industri konstruksi jalan, serta memberikan dasar untuk praktik-praktik yang lebih berkelanjutan dalam hal energi dan lingkungan. Menurut beberapa penelitian sebelumnya ini, topik yang menjadi konsentrasi peneliti, dikelompokkan menjadi lima yaitu: pertama, menemukan korelasi antara faktor peralatan dan dampaknya terhadap konsumsi energi. Kedua, membandingkan jumlah energi yang dibutuhkan untuk membuat campuran aspal berdasarkan jenis campuran aspal dan suhu campuran aspal. Ketiga, membandingkan jumlah energi dan emisi antara jalan dengan perkerasan lentur dan perkerasan kaku pada beberapa tahap siklus proyek. Keempat, membuat model untuk memprediksi jumlah energi alat berat dalam penggalian dan pengangkut massa. Kelima, mencari alternatif dan terobosan dari penggunaan bahan (material baru) dan metode baru untuk mengurangi konsumsi energi dan emisi yang dihasilkan oleh konstruksi jalan proyek.

## **2.7. Pemeliharaan Jalan dan Konsumsi Energi dan Emisi**

Estimasi dampak lingkungan selama fase *Maintenance and Rehabilitation* (M&R) tergantung pada penentuan frekuensi dan jenis kegiatan M&R yang dipengaruhi oleh penurunan kondisi perkerasan. Memburuknya kondisi perkerasan dipengaruhi oleh berbagai faktor seperti suhu, lalu lintas, curah hujan, dan karakteristik struktural. Dampak dari faktor-faktor ini seharusnya dievaluasi dengan benar untuk menentukan kondisi penurunan kondisi perkerasan serta menilai kegiatan M&R dan dampaknya (FHWA, 2019). Namun, tidak ada satupun studi LCA pada perkerasan yang mempertimbangkan kondisi perkerasan dan kerusakan pada waktu penilaian serta jenis kegiatan M&R yang dilakukan (Inyim et al., 2016). Kurangnya pertimbangan kondisi perkerasan pada saat evaluasi dampak di fase M&R dapat menyebabkan kesalahan

dalam penentuan jenis dan frekuensi kegiatan M&R dan dampaknya (Batouli and Mostafavi, 2015).

Perkerasan jalan pasti mengalami penurunan kondisi, daya dukung, dan kemampuan pelayanan seiring dengan bertambahnya usia, peningkatan volume lalu lintas, beban berat, dan dipengaruhi oleh faktor-faktor seperti jenis perkerasan dan kondisi lingkungan (Bhandari et al., 2023; Sidess et al., 2021; Hossain et al., 2020b; Llopis-Castelló et al., 2020). Berkurangnya kemampuan layanan ini disebabkan oleh kerusakan struktural dan fungsional. Kerusakan struktural mengacu pada kerusakan yang disebabkan oleh ketidakmampuan perkerasan jalan untuk menahan beban lalu lintas dan kondisi lingkungan, sedangkan kerusakan fungsional berkaitan dengan kegagalan perkerasan jalan dalam memberikan tingkat kenyamanan yang memadai (Kaloop et al., 2020; Park et al., 2007). Kualitas kehalusan permukaan jalan memainkan peran penting dalam kenyamanan yang dirasakan oleh pengguna jalan serta kinerja dan keselamatan berkendara secara keseluruhan (Wang et al., 2014; Tehrani et al., 2015; Kirbaş, 2018).

Pemeliharaan jalan biasanya diperlukan ketika kondisi perkerasan mencapai tingkat kekasaran tertentu yang dapat mengganggu kenyamanan dan keamanan pengguna jalan (Al-Suleiman et al., 1988). *International Roughness Index* (IRI) adalah sebuah indikator yang mengukur tingkat kekasaran permukaan jalan yang nilainya mencerminkan tingkat kenyamanan pengguna jalan dan kondisi perkerasan (Chen et al., 2022; Mahlberg et al., 2022). IRI telah muncul sebagai tolok ukur yang digunakan secara luas untuk mengevaluasi ketidakrataan permukaan jalan (Chen et al., 2020; Abdelaziz et al., 2020a; Hossain et al., 2019), awalnya diperkenalkan oleh *National Cooperative Highway Research Program* (NCHRP) dan kemudian dikembangkan oleh Bank Dunia pada tahun 1980-an (Elhadidy et al., 2019; Terzi, 2013a; Sayers et al., 1986; Sayers, 1995). Kemampuannya untuk ditransportasikan, korelasi yang sangat baik, dan validitas yang telah terbukti telah membuatnya menjadi metode yang lebih disukai oleh berbagai negara dan otoritas jalan, termasuk Australia, Kanada, Filipina, Indonesia, Austria, Belarusia, Republik Ceko, Irlandia, Polandia, Rusia, Uruguay, dan Amerika Serikat, seperti yang diakui oleh organisasi-organisasi seperti *Federal Highway Administration* (FHWA), *American Association of State Highway and Transportation Officials* (AASHTO), dan *US Department of Transportation* (US DOT)

(Li et al., 2018; Moffatt, 2007; Alberta Transportation, 2015; Department of Public Works and Highways, 2016; Menteri PUPR RI, 2014).

Semakin tinggi nilai IRI, semakin kasar permukaan jalan, dan semakin tidak nyaman bagi pengguna jalan (Sandamal et al., 2023). Penggunaan IRI dalam menentukan waktu pelaksanaan pemeliharaan jalan membantu pemilik jalan atau otoritas yang bertanggung jawab untuk merencanakan pemeliharaan dengan lebih efisien (Bosurgi et al., 2022). Hal ini dapat menghindari pengeluaran yang tidak perlu dan memastikan bahwa jalan-jalan tetap aman dan nyaman bagi pengguna (Odeleye, 2000). Proses menentukan waktu pelaksanaan pemeliharaan jalan berdasarkan nilai IRI menurut *Ministry of Public Works and Transport*, (2018) dapat mengikuti beberapa langkah berikut:

- Pemantauan Rutin: pertama-tama, jalan yang ingin dipelihara harus secara rutin dipantau untuk mengukur dan mencatat nilai IRI-nya. Pemantauan ini dapat dilakukan dengan menggunakan perangkat khusus yang dapat mengukur kekasaran permukaan jalan seperti: *Maymester*, *NAASRA Roughness Meter*, *Bump Integrator* (Pembuain et al., 2018), *General Motors Research (GMR) profilometer* (Sayers et al., 1986). Selain pengukuran nilai IRI, bisa juga dikumpulkan data lendutan menggunakan alat *Falling Weight Deflectometer (FWD)* atau *Heavy Weight Deflectometer (HWD)* yang digunakan untuk pengukuran di lapangan (Plati et al., 2016) untuk memberikan informasi penting tentang performa struktural perkerasan, membantu dalam mengevaluasi integritas struktural jalan, mendeteksi potensi kerusakan, dan merencanakan pemeliharaan atau rehabilitasi yang diperlukan (Sun, et al., 2024).
- Penetapan Ambang Batas: ambang batas nilai IRI harus ditetapkan sebagai pedoman untuk menentukan waktu pelaksanaan pemeliharaan. Ambang batas ini akan berbeda tergantung pada standar dan pedoman yang berlaku di wilayah atau negara tertentu. Misalnya, ambang batas IRI untuk jalan tol di Indonesia sesuai Standar Pelayanan Minimum (SPM) yang disyaratkan adalah  $\leq 4,0$  m/km (Menteri PUPR RI, 2014), maka ketika nilai IRI jalan melebihi ambang batas ini, pemeliharaan harus direncanakan dan dilaksanakan.
- Perencanaan Pemeliharaan: ketika nilai IRI melampaui ambang batas yang telah ditetapkan, perencanaan pemeliharaan jalan harus dimulai. Pemeliharaan dapat

meliputi berbagai jenis pekerjaan, seperti perbaikan lapisan perkerasan, penggantian lapisan perkerasan, atau perbaikan struktural yang lebih mendalam.

- **Prioritasi Pemeliharaan:** selain hanya berdasarkan pada nilai IRI, prioritas pemeliharaan juga dapat dipengaruhi oleh faktor lain seperti tingkat lalu lintas, kondisi struktural jalan, dan anggaran yang tersedia. Dalam beberapa kasus, jalan dengan nilai IRI yang lebih tinggi mungkin mendapatkan prioritas lebih tinggi jika kondisi strukturalnya lebih buruk atau jika jalan tersebut melayani lalu lintas yang sangat tinggi.
- **Pelaksanaan Pemeliharaan:** setelah waktu pelaksanaan pemeliharaan ditentukan, pekerjaan pemeliharaan jalan dapat dilaksanakan sesuai dengan rencana yang telah dibuat.

Pengukuran nilai IRI secara tradisional mengandalkan metode manual, yang memiliki beberapa kekurangan seperti proses yang memakan waktu, gangguan lalu lintas, dan biaya yang relatif tinggi (Sollazzo et al., 2017). Namun, saat ini dari hasil penelitian terdapat beberapa metode untuk mendapatkan nilai IRI, termasuk penggunaan model prediksi atau korelasi antar parameter yang mempengaruhi IRI (Chandra et al., 2013; Wang and Li, 2011; Park et al., 2007). Model prediksi yang digunakan seperti: model ANN (Kargah-Ostadi et al., 2010; El-Hakim and El-Badawy, 2013; Kargah-Ostadi and Stoffels, 2015; Mazari and Rodriguez, 2016; Hossain et al., 2017; Sollazzo et al., 2017; Lucey et al., 2019; Solatifar and Lavasani, 2020; Hossain et al., 2020a; Abdelaziz et al., 2020b; Alatoom and Al-Suleiman, 2021; Sbaih et al., 2022; Sultana et al., 2022; Suliman et al., 2023). Model *Adaptive Neural-Based Fuzzy Inference System* (ANFIS) (Terzi, 2013b), model *Deep Learning* dengan *Recurrent Neural Network* (RNN) (Choi and Do, 2020), model *Gene Expression Programming* (GEP) (Mazari and Rodriguez, 2016; Sbaih et al., 2022), model regresi linier berganda (Gharieb and Nishikawa, 2021; Albuquerque and Núñez, 2011; Pérez-acebo et al., 2023), model regresi (Nassiri et al., 2013; Khattak et al., 2014; Elhadidy et al., 2019; Zhang et al., 2021) model deterministik (Pérez-Acebo et al., 2021). Penelitian terakhir mengembangkan model prediksi IRI yang tepat dengan menggunakan Gaussian Process Regression (GPR) dan Locally Weighted Polynomials (LWP) (Kaloop et al., 2023), Random-effects model (Sun et al., 2023), *Extreme Gradient Boosting* (XGBoost) (Wang, Xiao, et al., 2023), Markov Chains (Alonso et al., 2023) dan metode Monte

Carlo (Rodríguez et al., 2022). Dalam penelitian Baykal et al., (2023), gabungan algoritma pembelajaran mesin digunakan untuk memprediksi IRI sebagai metrik evaluasi kekasaran jalan. Model ensemble yang terdiri dari *decision tree*, *AdaBoosting*, *random forest*, *extra tree*, *gradient boosting*, dan *XGBoosting* dikembangkan dengan memasukkan AGE, jumlah ESAL, dan jumlah struktural sebagai parameter input.

Beberapa penelitian menggunakan pemodelan ANN untuk memprediksi nilai IRI pada perkerasan lentur maupun perkerasan kaku telah menghasilkan model yang lebih akurat dibandingkan dengan model-model lainnya. Misalnya, penelitian yang dilakukan oleh Ziari et al., (2015) menunjukkan bahwa model ANN mampu memprediksi kondisi perkerasan jalan di masa depan dengan tingkat akurasi yang tinggi, baik untuk periode jangka pendek maupun jangka panjang, dibandingkan dengan model *Group Method of Data Handling* (GMDH). Penelitian lain yang dilakukan oleh Solatifar dan Lavasani (2020) menggambarkan bahwa penggunaan model Jaringan Syaraf Tiruan (ANN) untuk memprediksi nilai IRI berdasarkan data *General Pavement Study* (GPS) menunjukkan korelasi yang signifikan dengan hasil pengukuran, dibandingkan dengan pendekatan menggunakan model regresi polinomial. Temuan ini berlaku untuk kedua segmen GPS, yakni GPS-1 dan GPS-2. GPS merupakan komponen integral dari Program *Long-Term Pavement Performance* (LTPP), yang disusun untuk menghimpun data kinerja perkerasan. Lebih khusus, GPS-1 fokus pada *Asphalt Concrete (AC) on Granular Base*, sementara GPS-2 terfokus pada *Asphalt Concrete on Bound Base*. Hasil perbandingan antara model regresi dan ANN menunjukkan bahwa model ANN yang dikembangkan oleh Alatoom and Al-Suleiman, (2021) lebih akurat dalam memprediksi IRI dibandingkan dengan model regresi. Penelitian yang dilakukan oleh El-Hakim and El-Badawy, (2013) juga menunjukkan bahwa dengan menggunakan variabel input yang sama, model ANN menghasilkan tingkat akurasi prediksi yang lebih tinggi. Selain itu, tingkat bias dalam nilai IRI yang diprediksi menggunakan model ANN secara signifikan lebih rendah dibandingkan dengan model regresi menggunakan *Mechanistic-Empirical Pavement Design Guide* (MEPDG). Hossain et al., (2020a) menyimpulkan bahwa prediksi IRI menggunakan model ANN dapat digunakan untuk prediksi jangka pendek dan jangka panjang, dengan hasil yang mendekati nilai IRI yang diukur oleh LTPP. Hal ini telah terbukti secara analitis melalui perbandingan nilai *Root Mean Square Error* (RMSE) dan *Mean Absolute Percentage Error* (MAPE). Analisis

statistik seperti uji f dan uji t, serta uji *chi-square goodness of fit* menunjukkan bahwa tidak ada perbedaan signifikan antara nilai IRI yang diprediksi oleh model ANN dan nilai yang diukur oleh *Long Term Pavement Performance* (LTPP). Sultana et al., (2022) menggunakan model ANN untuk mengembangkan prediksi kinerja *Jointed Reinforced Concrete Pavement* (JRCP). Model ANN dengan kinerja terbaik menghasilkan ukuran statistik dengan  $R^2 = 0.93$  yang dapat digunakan untuk memperkirakan nilai IRI dengan mempertimbangkan riwayat pemeliharaan dan perbaikan perkerasan. Penelitian terbaru yang dilakukan oleh Gharieb et al., (2022) menggunakan *database* yang sama untuk dua pemodelan yang berbeda, dari National Road Network (NRN) Laos *Pavement Management System* (PMS) menunjukkan hasil model prediksi IRI dengan ANN lebih akurat dibandingkan model *Multiple Linear Regression* (MLR).

## **2.8. Metode Perhitungan *Embodied Energy***

Ada tiga metode yang umum digunakan untuk menghitung energi yang diwujudkan (*embodied energy*):

- (1) berbasis proses,
- (2) berbasis *input-output* (IO), dan
- (3) berbasis *hybrid*.

Masing-masing dari tiga metode ini memiliki batasan tergantung pada jenis dan ketersediaan data yang digunakan. Karena perbedaan dalam cakupan sistem mereka dan batas-batas input energi yang diakomodasi, hasil dari ketiga metode ini tidak dapat dibandingkan secara langsung (Dixit et al., 2015).

Perhitungan energi yang terkandung (*embodied energy*) berdasarkan proses menggunakan pendekatan *bottom-up*, dimulai dari bahan bangunan sebagai produk akhir dan kemudian mundur ke hulu untuk mencakup sebanyak mungkin input energi langsung dan tidak langsung. Sebagian besar data penggunaan energi langsung berasal dari pabrik material (Dixit et al., 2015). Dalam penilaian siklus hidup, data proses digunakan untuk menyusun inventaris siklus hidup suatu produk. Data tersebut dapat diperoleh langsung dari basis data inventaris siklus hidup atau sumber data lain yang mewakili proses yang relevan (Abanda et al., 2013).

Penilaian siklus hidup input-output adalah metode *top-down* yang menganalisis dampak lingkungan dari produk dari tahap awal hingga pintu gerbang (*cradle-to-gate*)

berdasarkan analisis *input-output* lingkungan (Abanda et al., 2013). Perhitungan energi yang berbasis *input-output* menggunakan akun *input-output* nasional, yang mencatat aliran barang dan jasa antar sektor industri dalam satuan moneter. Akun *input-output* nasional diterbitkan secara berkala dengan tingkat rincian yang berbeda. Untuk menghitung energi yang terkandung, digunakan matriks kuadrat dari koefisien kebutuhan langsung, yang mencerminkan input langsung yang dibutuhkan untuk menghasilkan satu unit output di sektor industri tertentu. Persyaratan langsung ini ditambah dengan persyaratan tidak langsung (Dixit et al., 2015).

Dalam penilaian siklus hidup *hybrid*, digunakan kombinasi proses, *input-output* sektoral, dan data akun lingkungan. Metode ini dirancang untuk mengoptimalkan manfaat dari analisis *input-output* dan proses, serta menghilangkan atau meminimalkan kesalahan dan batasan yang mungkin ada dalam kedua metode tersebut (Abanda et al., 2013). Ada dua jenis analisis *hybrid*:

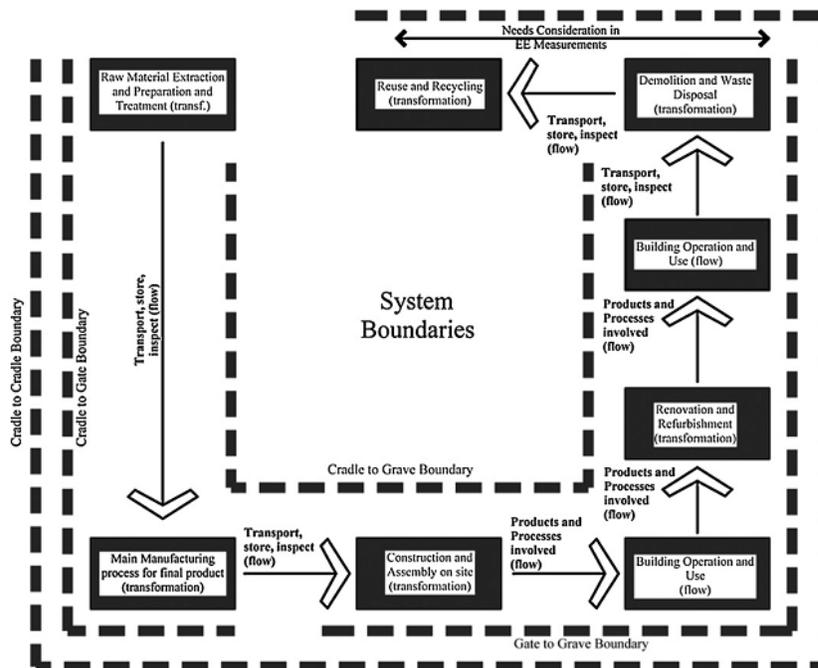
- (1) berbasis proses dan
- (2) berbasis IO.

Dalam analisis hibrida berbasis proses, kerangka dasarnya tetap menggunakan pendekatan berbasis proses, dengan memasukkan data *input-output* ke dalam kerangka tersebut untuk meningkatkan kelengkapannya (Dixit et al., 2015). Analisis hibrida berbasis proses menggabungkan analisis *input-output* ke dalam proses produksi material yang kompleks, sehingga mengatasi kekurangan yang ada dalam analisis proses tersebut. Namun, metode ini dapat menghadapi tantangan ketika melibatkan bahan-bahan yang kompleks yang melibatkan lebih dari satu bahan (Abanda et al., 2013).

Dalam analisis hibrid berbasis *input-output*, data penggunaan energi langsung dikumpulkan dan dimasukkan ke dalam kerangka kerja berbasis *input-output* (Dixit et al., 2015). Analisis hibrid berbasis *input-output* mengintegrasikan identifikasi dan ekstraksi jalur energi langsung dari analisis berbasis *input-output*, sehingga menggabungkan data berbasis proses yang andal dan akurat untuk menghindari efek tidak langsung. Meskipun terdapat ketidaklengkapan atau kesalahan sekitar 20% dalam perhitungan dan analisis energi yang terkandung, metode ini dianggap lengkap dan hampir sempurna dalam analisis siklus hidup bangunan (Abanda et al., 2013).

## 2.9. Batas Sistem Perhitungan *Embodied Energy*

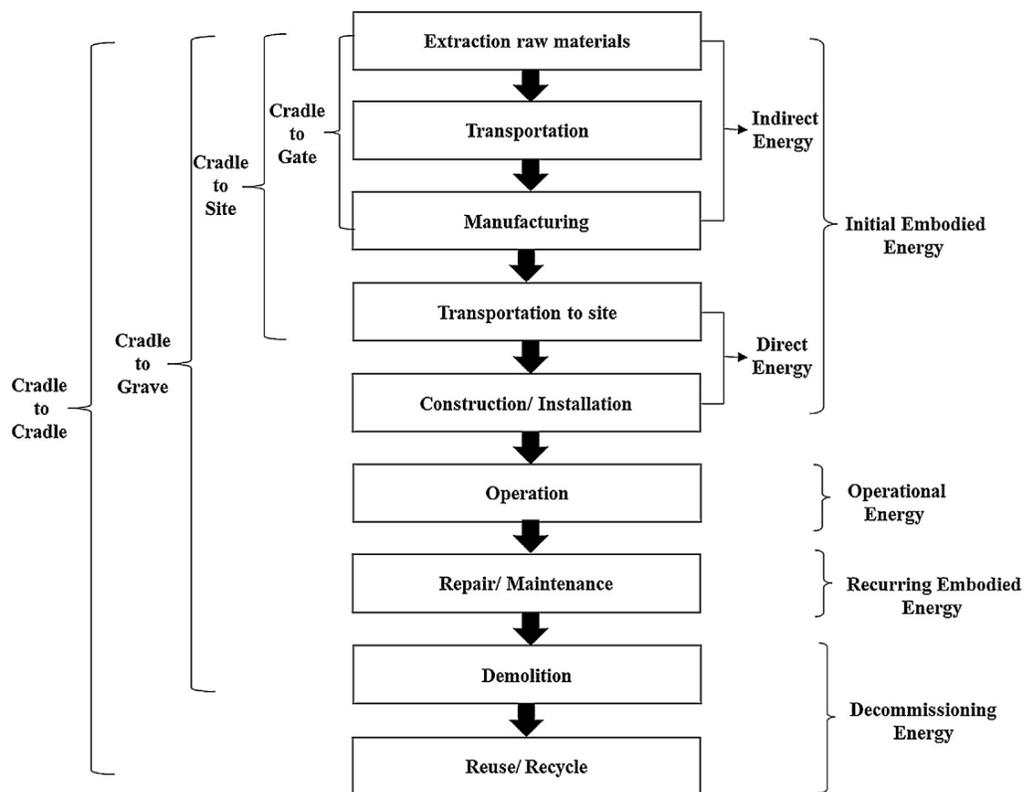
Batas sistem merujuk pada produk dan proses yang digunakan dalam pembuatan suatu produk. Batas sistem juga membatasi input energi dan material yang diperhitungkan dalam perhitungan energi yang diwujudkan. Dalam konteks bangunan, batas sistem dapat mencakup semua tahap mulai dari ekstraksi bahan baku hingga pembuangan. Ada beberapa definisi batas sistem yang umum digunakan, seperti seperti "*cradle to gate*," "*cradle to site*," dan "*cradle to grave*". Batas sistem "*cradle to gate*" mencakup tahap penambangan bahan baku, manufaktur, dan pengemasan produk jadi. Namun, tidak termasuk transportasi bahan jadi ke lokasi konstruksi atau toko ritel, yang termasuk dalam batas sistem "*cradle to site*". Batas sistem "*cradle to grave*" mencakup proses konstruksi, operasi, pemeliharaan, pembongkaran, dan pembuangan. Batas sistem ini penting untuk menghitung total energi yang diwujudkan dalam siklus hidup, yang merupakan faktor kunci dalam menciptakan lingkungan yang berkelanjutan dengan energi nol atau karbon netral (Dixit, 2017). Gambar 2.7 menunjukkan dan menjelaskan *system boundaries* siklus hidup material bangunan, dengan kriteria sebagai berikut:



Gambar 2. 7 Batas Sistem dalam Siklus Hidup Bahan Bangunan (Dixit et al., 2010)

- a. *Cradle to grave*, ruang lingkup pada bagian ini dimulai dari *raw material* sampai pada pengoperasian produk.
- b. *Cradle to gate*, ruang lingkup pada analisis daur hidup dimulai dari *raw material* sampai ke gate sebelum proses operasi.
- c. *Gate to gate* merupakan ruang lingkup pada analisis daur hidup yang terpendek karena hanya meninjau kegiatan yang terdekat.
- d. *Cradle to cradle* merupakan bagian dari analisis daur hidup yang menunjukkan ruang lingkup dari *raw material* sampai pada daur ulang material.

Secara lebih detail, energi dalam siklus hidup bangunan mencakup energi awal yang diwujudkan, energi operasional, energi yang diwujudkan berulang, dan energi penonaktifan. Gambar 2.8 menunjukkan konsumsi energi bangunan selama periode siklus hidupnya. Energi awal yang diwujudkan adalah energi yang digunakan dalam produksi produk, mulai dari ekstraksi bahan baku hingga pengiriman produk ke lokasi bangunan. (Zeng and Chini, 2017).



**Gambar 2. 8** Konsumsi Energi Bangunan melalui Periode Siklus Hidupnya  
(Zeng and Chini, 2017)

Menurut (Cole, 1999) energi awal (*initial embodied energy*) yang diwujudkan terdiri dari energi langsung (*direct energy*) dan energi tidak langsung (*indirect energy*). Energi langsung digunakan dalam proses konstruksi bangunan, sementara energi tidak langsung digunakan dalam ekstraksi bahan baku, transportasi, dan produksi bahan bangunan. Energi operasional (*operational energy*) adalah energi yang digunakan selama masa operasional bangunan, seperti energi pemanasan, pendinginan, penerangan, dan penggunaan peralatan. Energi yang diwujudkan berulang (*recurring embodied energy*) adalah energi yang diperlukan untuk pemeliharaan dan renovasi bangunan selama masa pakainya. Energi penonaktifan (*decommissioning energy*) adalah energi yang digunakan selama proses dekonstruksi dan daur ulang bangunan. Gambar 2.8 juga menggambarkan fase-fase *Life Cycle Assessment* (LCA) dan proses yang terkait, termasuk "*cradle to gate*" yang meliputi ekstraksi bahan baku, transportasi, dan proses produksi (Zeng and Chini, 2017).

#### **2.10. Konsumsi Energi di Pekerjaan Jalan**

Sesuai sifatnya, konstruksi melibatkan manipulasi dan penggunaan sejumlah besar bahan alami dan buatan manusia. Juga, konstruksi dan operasi infrastruktur adalah pengguna energi yang besar (Park et al., 2003). Secara umum, konsumsi energi terjadi selama dua fase utama konstruksi perkerasan, yaitu, produksi dan konstruksi bahan. Tahap produksi bahan meliputi ekstraksi dan pemrosesan awal agregat, aspal, semen, dan bahan pelengkap lainnya seperti remah karet atau campuran semen. Proses dalam fase ini meliputi perolehan bahan baku, pengangkutan bahan mentah dari dan ke pabrik, dan pembuatan bahan. Pengangkutan material yang diproduksi dari dan ke lokasi konstruksi biasanya dipertimbangkan dalam fase konstruksi (Wang et al., 2012).

Menurut Zhang et al., (2019) konsumsi energi sektor konstruksi bangunan yang terkait dengan produksi bahan harus diperhitungkan sambil menghitung konsumsi energi dari sektor konstruksi bangunan untuk secara komprehensif mengukur dampak konstruksi bangunan baru pada konsumsi energi seluruh masyarakat. Konsumsi energi konstruksi bangunan mengikuti 4 tahap yaitu:

- A1, ekstraksi bahan baku dan transportasi: tahap ini mengacu pada ekstraksi bahan baku, sampai memasuki pabrik. Konsumsi energi dari peralatan yang digunakan untuk mengekstrak bahan mentah dan mengangkutnya ke pabrik.

- A2, pembuatan bahan bangunan: tahap ini berlangsung dari waktu bahan mentah memasuki pabrik sampai bahan bangunan selesai keluar dari pabrik. Konsumsi energi dari sistem produksi langsung dan tidak langsung (sistem produksi tambahan, terafiliasi).
- B, transportasi bahan bangunan: tahap ini dimulai sejak bahan bangunan keluar dari pabrik sampai tiba di lokasi konstruksi. Energi yang dikonsumsi oleh kendaraan yang digunakan untuk mengangkut bahan bangunan.
- C, konstruksi di tempat: konsumsi energi dari peralatan yang digunakan di tempat untuk konstruksi bangunan.

Tahapan A1 dan A2 mencakup seluruh proses produksi bahan bangunan, dari ekstraksi bahan baku hingga produk akhir, dan konsumsi energi untuk produksi bahan selama dua tahap ini juga dapat didefinisikan sebagai energi yang terkandung dalam bahan bangunan.

Penilaian inventaris siklus hidup *Life cycle inventory* (LCI) dari energi yang dikonsumsi oleh perkerasan dilakukan setelah jumlah dan jenis bahan yang dibutuhkan untuk konstruksi mereka ditetapkan. LCI menggambarkan aliran energi ke dan dari sistem, dan terdiri dari 5 langkah dasar (Zapata and Gambatese, 2005), yaitu:

1. Ekstraksi bahan baku: Sub langkah ini mencakup ekstraksi semua bahan baku yang diperlukan untuk produksi *Portland Cement Concrete* (PCC) dan perkerasan aspal.
2. Pabrikasi: Sub langkah ini terdiri dari semua proses mekanis dan kimia yang diperlukan dalam transformasi bahan mentah menjadi aspal dan PCC.
3. Penempatan material perkerasan jalan: Setelah bahan baku diubah menjadi aspal dan PCC, material perkerasan diangkut dan ditempatkan di lokasi.
4. Pemeliharaan: Setelah struktur perkerasan dibangun, diperlukan perbaikan dan peningkatan berkala.
5. Penghapusan, daur ulang, dan pembuangan: ketika struktur perkerasan mencapai akhir masa pakainya, perlu untuk menghapus dan mengganti struktur lama dengan yang baru yang sesuai dengan tujuan penggunaan jalan.

### **2.10.1. Konsumsi Energi dan Emisi Perkerasan Lentur (Aspal)**

Konstruksi perkerasan aspal menghasilkan konsumsi energi dan emisi gas rumah kaca yang besar, masalah lingkungan seperti itu semakin meningkat menarik

perhatian luas di dalam dan luar negeri. Menurut data survei luar negeri oleh International Road Federation, konstruksi dari perkerasan aspal dua lajur standar dengan panjang 1 km membutuhkan sekitar  $7.00 \times 10^6$  MJ energi, yang setara dengan 240 ton batu bara standar (Han et al., 2021; Mao et al., 2023). Secara global, infrastruktur perkerasan jalan terdiri dari sekitar 16,3 juta kilometer dan sekitar 25 juta kilometer jalan baru diperkirakan akan dibangun pada tahun 2050 (Laurance et al., 2014; Plati, 2019). Di Eropa, total produksi Aspal Campuran Panas (Hot Mix Asphalt/HMA) dan Aspal Campuran Hangat (Warm Mix Asphalt/WMA) kurang lebih setara dengan 300 juta metrik ton setiap tahun antara tahun 2008 dan 2018 (Barbieri et al., 2021). Perkerasan aspal terdiri dari agregat, semen, dan pengikat aspal. Pembuatan bahan baku dan konstruksi perkerasan aspal mengkonsumsi banyak energi dan mengeluarkan gas rumah kaca (GRK) dalam jumlah besar (Ma et al., 2016). Produk aspal merupakan bagian dari sektor pemurnian minyak bumi, produksinya meliputi fase sebagai berikut: ekstraksi, transportasi/penyimpanan, pemanasan, penyulingan, pendinginan, dan pemrosesan akhir (Sizirici et al., 2021). Selama penyulingan minyak bumi, minyak mentah mengalami tekanan tinggi dan suhu lebih dari  $300^\circ$  C. Sebagian besar energi yang dikonsumsi pada proses penyulingan yang digunakan untuk pemanasan fluida dan pembangkit uap. Energi yang dikonsumsi dalam proses pemurnian, sekitar 40% untuk bitumen dan 60% untuk produk yang lebih ringan. Aspal telah diproduksi kemudian dikirim ke *Asphalt Mixing Plant*, selanjutnya disimpan dalam wadah besar berupa tangki (silo) di mana aspal secara terus-menerus dipanaskan supaya tetap cair (Ma et al., 2023). Untuk tujuan penyimpanan pemanasan aspal dengan suhu yang stabil membutuhkan konsumsi energi tambahan. Ketika pesanan beton aspal diterima, agregat disalurkan dari stock penimbunan ke pengering (*dryer*) di mana agregat dikeringkan dan dipanaskan pada suhu antara  $150^\circ$  dan  $170^\circ$  C. Jika sudah kering dan panas, maka campuran agregat dikirim ke mixer dimana bitumen (aspal cair) disemprotkan melalui pipa ke dalam mixer. Campuran aspal akhir ini disimpan dalam tempat penyimpanan panas sebelum diangkut ke lokasi konstruksi atau langsung dituangkan ke dalam bak truk kemudian dibawa ke lokasi pekerjaan (Zapata and Gambatese, 2005).

### **2.10.2. Konsumsi Energi dan Emisi Perkerasan Kaku (Beton Semen Portland)**

Perkerasan kaku dapat dibuat menggunakan struktur beton yang terbuat dari beton semen Portland, baik dengan atau tanpa tulangan baja. Semen Portland utamanya terbuat dari bahan seperti batu kapur atau kapur, serta alumina dan silika yang dapat ditemukan dalam bentuk tanah liat atau lempung. Proses pencampuran dan penggilingan bahan baku ini dapat dilakukan dengan menggunakan air atau dalam kondisi kering. Jenis proses yang digunakan ini menentukan apakah pembuatan semen berlangsung dalam kondisi "basah" atau "kering" (Benhelal et al., 2013). Pemilihan antara proses basah dan kering didasarkan pada beberapa faktor, seperti sifat-sifat bahan baku yang tersedia, biaya bahan bakar, lokasi proyek, serta kondisi-kondisi lainnya. Pada proses basah, biaya konstruksi pabrik cenderung lebih rendah, dan hasil produksi berkualitas tinggi dapat dicapai dengan relatif mudah. Sementara itu, pada proses kering, konsumsi energi lebih efisien dan biaya operasional cenderung lebih rendah (Lavagna and Nisticò, 2023).

Menurut Organisasi Pengembangan Industri Perserikatan Bangsa-Bangsa, kebutuhan biaya untuk energi sebesar 20-30% dari biaya produksi semen Portland. Sembilan puluh persen atau lebih dari bahan bakar yang dikonsumsi adalah untuk pembakaran klinker. Sekitar 40% dari listrik yang dikonsumsi digunakan untuk menyelesaikan penggilingan, dan sedikit kurang dari 30% dikonsumsi oleh proses bahan baku dan proses pembakaran klinker. Proses penggilingan akhir terutama mengkonsumsi daya listrik untuk pabrik, dan proses pembakaran klinker terutama untuk kipas. Penggunaan energi untuk produksi PCC, yaitu, pengangkutan dan pencampuran semen, agregat, air, dan campuran, jauh lebih sedikit daripada untuk produksi semen itu sendiri (El-Salamony et al., 2020).

Berbeda dengan aspal, dalam campuran PCC tidak memerlukan pengeringan agregat sebelum dicampur. Oleh karena itu, energi untuk memproduksi PCC (tidak termasuk produksi bahan baku itu sendiri, yang dipertimbangkan dan disertakan secara terpisah). Sebagian besar berkaitan dengan pengangkutan bahan baku, dan sebagian kecil untuk mengoperasikan *stone crusher* (Chen et al., 2021). Diperkirakan bahwa pasir mewakili sekitar 2% dari energi yang terkandung dalam PCC, sedangkan agregat yang dihancurkan mewakili sekitar 6%. Nilai ini mencerminkan 92% energi terkandung (*embodied energy*) untuk semen yang digunakan dalam PCC. Produksi bahan baku dan

PCC sendiri membutuhkan penggunaan energi intensif hanya untuk proses pembuatan semen (Akbarnezhad and Xiao, 2017). Tidak ada pengeluaran energi tambahan yang signifikan terjadi dalam penyimpanan bahan atau dalam proses selanjutnya seperti pengeringan agregat sebelum pencampuran. Memang ada konsumsi energi dalam pengangkutan bahan mentah dan jadi di industri beton dan semen. Namun, pengeluaran ini cukup kecil jika dibandingkan dengan bahan bakar yang dikonsumsi oleh tanker minyak untuk mengangkut minyak mentah, dan energi yang dikonsumsi untuk memproduksi semen (Zapata and Gambatese, 2005).

Secara umum, perkerasan kaku memiliki dampak dan biaya awal yang lebih tinggi, namun persyaratan pemeliharaan dan perbaikan yang lebih rendah selama masa layan. Pabrik pencampuran beton Portland menimbulkan dampak pada: atmosfer melalui polusi debu mineral dari manipulasi agregat, semen dan, mungkin, abu terbang (bila digunakan); pada air melalui pembuangan air yang bersirkulasi di pabrik pencampuran dan kendaraan pengangkut beton; karena kebisingan dan getaran yang dihasilkan oleh peralatan yang digunakan untuk memuat agregat di bunker, ban berjalan, pengaduk, dan kendaraan yang mengangkut beton ke lokasi konstruksi (Dumitrescu et al., 2014).

### **2.11. Metode Perhitungan Konsumsi Energi**

Berdasarkan Gambar 2.6, menurut Dixit *et al.*, (2010) energi yang digunakan dalam pekerjaan jalan termasuk dalam kategori energi yang diwujudkan (*embodied energy*) dan energi langsung (*direct energy*), dan ini mempengaruhi cara perhitungan energinya. Perhitungan konsumsi energi dalam pekerjaan konstruksi secara umum dapat dibagi menjadi empat bagian, yaitu:

1. Pekerjaan penambangan dan produksi bahan baku *raw material* (*extraction*).
2. Pekerjaan pengolahan bahan baku (*raw material*) menjadi bahan bangunan dan jalan (*assembly/mixing*).
3. Pekerjaan konstruksi bangunan dan jalan di lokasi (*on site construction*).
4. Kegiatan transportasi material di lokasi dan di luar lokasi (*off site* maupun *on site*).

Model matematika memiliki potensi untuk meramalkan jumlah energi yang dihasilkan, emisi gas rumah kaca, dan limbah dalam tahap desain proyek konstruksi.



pada akhirnya menentukan faktor beban khusus untuk jenis peralatan dan kondisi aplikasi/pengoperasian. Untuk mengetahui nilai-nilai ini, konsumsi dapat dihitung menggunakan Persamaan 2.1 berikut ini:

$$q_d = P \cdot k_o \cdot s_d \dots\dots\dots(2.1)$$

dimana:

P = peringkat daya mesin (kW)

k<sub>o</sub> = faktor beban mesin

s<sub>d</sub> = konsumsi bahan bakar spesifik (kg/(kW·h))

### 2.11.2. Metode Perhitungan Energi Pada Pekerjaan Tanah

Berdasarkan hasil penelitian Hajji and Lewis (2013); Hajji and M. P. Lewis (2013), formula perhitungan keseluruhan untuk mendapatkan total penggunaan bahan bakar dan perkiraan emisi dibentuk dengan menggabungkan model tingkat produktivitas dengan algoritma perhitungan model NONROAD. Untuk memperkirakan total emisi dan penggunaan bahan bakar dari jumlah tanah tertentu yang digali oleh excavator, total durasi aktivitas diperlukan. Total durasi dalam jam (jam) dapat diperoleh dengan membagi jumlah total galian/tanah dengan tingkat produktivitas dalam satuan loose cubic yard per jam (lcy/jam). Setelah total durasi yang diperoleh dan besarnya daya mesin (engine HP) diketahui, total emisi dalam gram (gr), dan total penggunaan bahan bakar (gal) dapat dihitung dengan mengalikan EF (g/hp-jam) atau BSFC (gal/jam) dari NONROAD dengan tenaga kuda (hp) dan durasi (jam). Dengan Persamaan 2.2 dan 2.3 sebagai berikut :

$$F(\text{gal}) = \frac{\text{Soil Quantity}(\text{cy})}{\text{Productivity Rate}(\frac{\text{cy}}{\text{hr}})} * \text{engine horsepower}(\text{hp}) * \text{BSFC}(\frac{\text{gal}}{\text{hp.hr}}) \dots\dots\dots(2.2)$$

$$F = \text{Duration} * \text{HP} * (\text{BSFC}) * \text{TAF} \dots\dots\dots(2.3)$$

dimana:

F = penggunaan bahan bakar (gal)

Q = jumlah tanah yang dipindahkan (cy)

HP = tenaga mesin (hp)

TAF = faktor penyesuaian sementara (tanpa unit)

BSFC = *brake specific fuel consumption* (gal/hp.hr)

Dalam penelitian yang dilakukan oleh Trani *et al.*, (2016) konsumsi bahan bakar yang diperlukan untuk melakukan 1 m<sup>3</sup> dari aktivitas apa pun dapat diperoleh dengan menggunakan Persamaan 2.4 sebagai berikut:

$$\text{Fuel consumption}_{\text{activity}} \left( \frac{1}{\text{m}^3} \right) = \sum_{i=1}^{i=n} \text{Fuel consumption}_i \cdot \text{Pr}_i \dots\dots\dots(2.4)$$

dimana:

Konsumsi bahan bakar = bahan bakar yang dikonsumsi oleh peralatan i nyatakan dalam l/jam

Pr<sub>i</sub> = produktivitas peralatan i yang dinyatakan dalam h/m<sup>3</sup>

Menurut Badan Perlindungan Lingkungan Amerika Serikat (US EPA, 2010) konsumsi bahan bakar peralatan tertentu dapat dihitung dengan Persamaan 2.5 sebagai berikut:

$$\text{Fuel consumption}_i \left( \frac{1}{\text{h}} \right) = P_i \cdot \text{SC}_i \cdot \text{LF}_{ij} \cdot \frac{1}{\rho_{\text{fuel}}} \dots\dots\dots(2.5)$$

dimana:

P<sub>i</sub> = kekuatan peralatan i yang dinyatakan dalam kW

SC<sub>i</sub> = konsumsi spesifik dari peralatan i dan tergantung pada kurva karakteristik mesin (dinyatakan dalam kg / kW h)

LF<sub>ij</sub> = faktor beban dari peralatan i dan mengacu pada pemuatan mesin secara instan terkait dengan kapasitas maksimumnya (dinyatakan sebagai%) tergantung pada aktivitas i dan lapisan tanah j

ρ<sub>fuel</sub> = bobot spesifik bahan bakar yang berkisar antara 0,83 hingga 0,87 kg/l. Berat spesifik rata-rata bahan bakar diasumsikan 0,85 kg/l

Konsumsi bahan bakar kendaraan transportasi dapat dihitung berdasarkan jarak transportasi dan efisiensi bahan bakar (berbeda antara situasi yang terisi penuh atau tanpa muatan). Untuk peralatan bertenaga diesel lainnya, konsumsi bahan bakar dapat dihitung berdasarkan Persamaan (4). Tingkat konsumsi bahan bakar mesin diesel adalah

sekitar 180 g/(hp h) dan 1 hp = 0,735 kW. Konsumsi bahan bakar dapat dikonversi menjadi 0,244 kg / kWh (Ma et al., 2016) dengan Persamaan 2.6 sebagai berikut:

$$M = 0.244 \times T \times P \dots\dots\dots(2.6)$$

dimana:

M = konsumsi bahan bakar dalam kg

T = waktu kerja mesin dalam jam

P = tenaga mesin dalam KW

### 2.11.3. Model Termodinamika untuk Memprediksi Konsumsi Energi di Asphalt Mixing Plant (AMP)

Konsumsi energi pada tahap produksi campuran aspal telah dipublikan dalam beberapa penelitian. Misalnya, konsumsi energi di *asphalt mixing plant* tipe *continuous batch* dibandingkan dengan yang di *drum mix plant* melalui dua studi kasus di Singapura (Ang et al., 1993), namun keterbatasan penelitian ini adalah efek dari bahan bakar dan jenis campuran serta faktor lingkungan tidak dipertimbangkan. Konsumsi bahan bakar solar (*diesel fuel*) yang digunakan pada drum burner (*dryer*) untuk mengeringkan dan memanaskan agregat diperkirakan dari Persamaan 2.7 sebagai berikut:

$$E_{dry} = M_a (W/100)(70 C_p + C_l) + M_a (70 C_a), \dots\dots\dots(2.7)$$

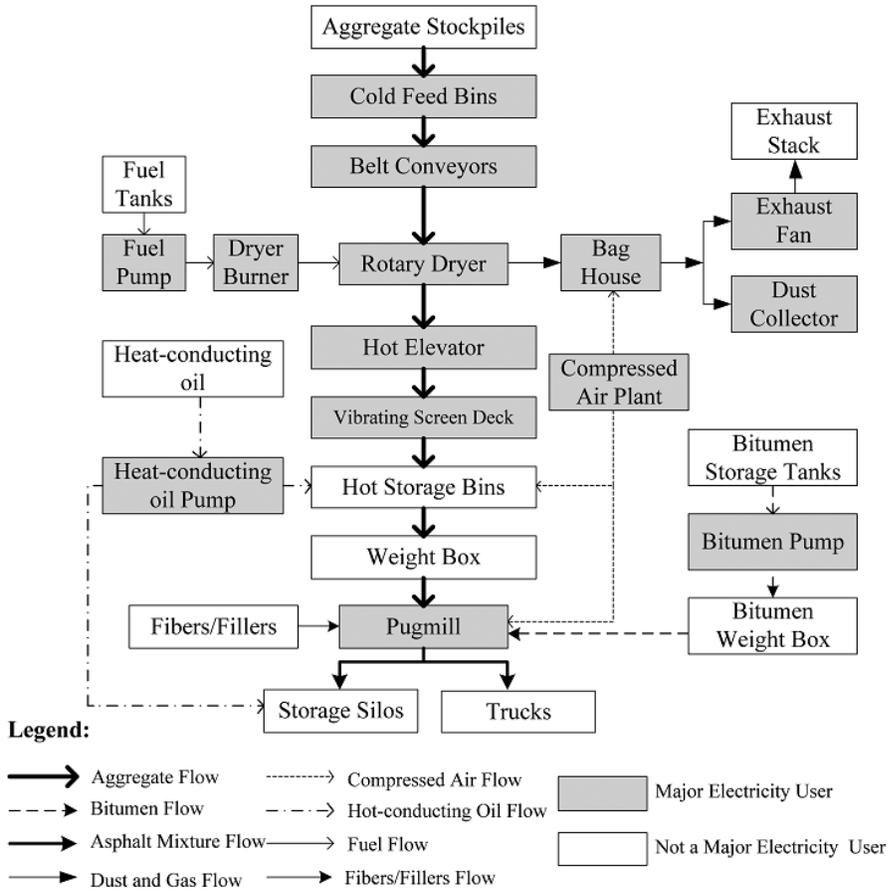
Konsumsi energi untuk memanaskan campuran agregat,  $E_{heat}$ , adalah yang digunakan untuk memanaskan campuran dari titik didih air ke suhu pencampuran khusus T yang berkisar antara 150 hingga 170 ° C. Itu dihitung dari Persamaan 2.8 sebagai berikut:

$$E_{heat} = M_a C_a (T - 100), \dots\dots\dots(2.8)$$

Model regresi dikembangkan oleh Gillespie (2012), untuk memperkirakan penggunaan energi dalam produksi campuran aspal tetapi model ini didasarkan pada catatan dan hampir tidak dapat mencakup berbagai faktor yang mempengaruhi.

Menurut Chong *et al.*, (2016) konsumsi energi dalam produksi campuran aspal diatur oleh dua hukum fisik: konservasi energi dan konservasi massa. Penting untuk memahami perpindahan panas secara terperinci dan proses perubahan massal pada setiap tahap produksi. Konsumsi energi dibagi menjadi tiga komponen yaitu:

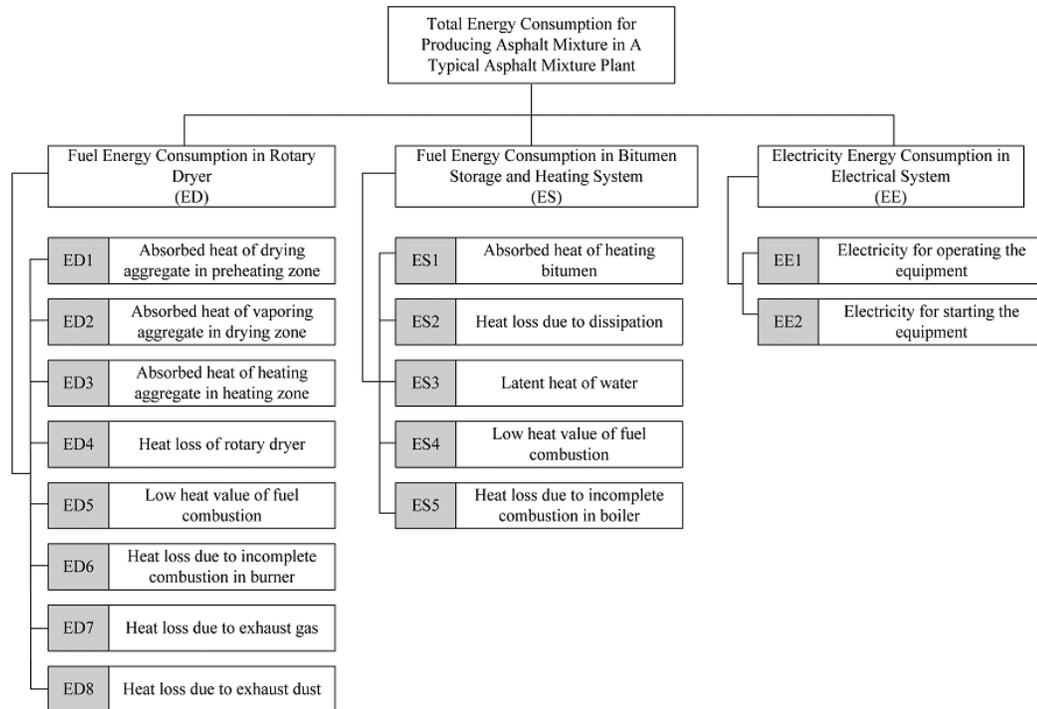
- (1) bahan bakar yang dikonsumsi dalam *rotary dryer*,
- (2) bahan bakar yang dikonsumsi dalam penyimpanan aspal dan sistem pemanas, dan
- (3) listrik yang dikonsumsi oleh semua pengguna listrik seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.10 berikut ini.



**Gambar 2. 10 Komponen Utama dan Aliran Material dalam *Asphalt Mixing Plant (AMP) Tipe Batch Plant***  
(Chong *et al.*, 2016)

Kehilangan energi juga terjadi pada *hot elevator*, *heat storage*, dan *pugmill*, kehilangan tersebut dikompensasi dengan memanaskan agregat yang keluar dari *rotary*

dryer. Suhu ini digunakan untuk tujuan pemodelan. Rincian dari ketiga komponen tersebut ditunjukkan pada Gambar 2.11 berikut ini.



**Gambar 2. 11 Breakdown Structure Konsumsi Energi**  
(Chong et al., 2016)

#### 2.11.4. Konsumsi Bahan Bakar dan Emisi pada Pekerjaan Aspal di Lapangan

Berdasarkan model simulasi yang dikembangkan oleh Zhang (2015), menggunakan model EPA NONROAD (US EPA, 2010) untuk memperkirakan konsumsi bahan bakar dan emisi peralatan non-road khususnya peralatan pekerjaan konstruksi jalan. Model EPA NONROAD ini digunakan untuk memperkirakan konsumsi bahan bakar dan emisi dari sudut pandang proyek, wilayah, dan bahkan negara, dirumuskan sebagai berikut:

$$\text{Fuel consumption (liter)} = \text{BSFC} \times \text{Power (hp)} \times \text{Load factor} \times \text{Operating hours (h)} \dots \dots \dots (2.9)$$

$$\text{Emission (g)} = \text{Power (hp)} \times \text{Emission rate (g/hp} \cdot \text{h)} \times \text{Load factor} \times \text{Operating hours (h)} \dots \dots \dots (2.10)$$

dimana:

- BSFC = *the brake-specific fuel consumption*, setara dengan  $L = \text{hp}\cdot\text{h}$ , dengan daya penuh; daya adalah daya rem terukur
- Emission rate = tingkat emisi yang dikeluarkan oleh peralatan per satuan daya selama 1 jam
- load factor = rasio daya aktual relatif terhadap daya terukur peralatan berdasarkan karakteristik aplikasi peralatan
- operating hours = waktu peralatan dioperasikan

Nilai BSFC (dalam satuan  $L = \text{hp}\cdot\text{h}$ ) ditransformasikan dari nilai EPA dalam satuan  $\text{kg} = \text{hp}\cdot\text{h}$ .

Untuk menghitung emisi karbon ekivalen setelah didapatkan konsumsi bahan bakar dari persamaan (2.9). maka dapat disederhanakan dengan persamaan berikut ini :

Emisi karbon ( $\text{kgCO}_2$ ) = Konsumsi bahan bakar (liter)  $\times$  Koefisien emisi karbon ekivalen  
 $(\text{kgCO}_2/\text{liter})\dots\dots\dots(2.11)$

Dimana koefisien emisi karbon ekivalen sebesar 2.697  $\text{kg CO}_2/\text{liter}$  untuk minyak diesel (Chong and Wang, 2017; U.S. Environmental Protection Agency, 2014) dan 2.351 ( $\text{kg CO}_2/\text{liter}$ ) untuk minyak bensin (Defra, 2012).

**Tabel 2. 1 Nilai *Brake-Specific Fuel Consumption* dari Berbagai Sumber**

Referensi	<i>Brake-Specific Fuel Consumption (BSFC)</i>			
		<i>Original value</i>	Unit	<i>Value in unit of L/hp.h</i>
Runge (1998)		0.3	L/kW.h	0.2238
Filas (2002)		0.218 – 0.268	kg/kW.h	0.1913-0.2352
USEPA (2010)	Engine Power	0.1851	kg/hp.h	0.2199
	< 100 hp	0.408	lb/hp.h	
	Engine Power	0.1665	kg/hp.h	0.1978
	$\geq$ 100 hp	0.367	lb/hp .h	

sumber: Zhang, 2015

**Tabel 2. 2 Koefisien Beban Lingkungan dari Kendaraan Non-Jalan Raya**

Tipe kendaraan	MJ/l	GHG ( $\text{kgCO}_2\text{-e/l}$ )	$\text{CO}_2$ (kg/l)	$\text{CH}_4$ (g/l)	$\text{N}_2\text{O}$ (g/l)
Peralatan konstruksi	38.30	2.721	2.697	0.143	0.069

sumber: Chong and Wang, 2017

Faktor beban mesin didefinisikan sebagai bagian dari daya mesin terukur yang digunakan selama proses kerja. Ini sangat spesifik untuk jenis peralatan dan kondisi aplikasi/operasi, tetapi tidak tergantung pada ukuran peralatan dan daya mesin terukur. Untuk peralatan siklik dapat berkisar dari di bawah 0,1 selama operasi idle hingga 1,0 selama operasi daya penuh. Peralatan kontinu biasanya memiliki faktor beban yang relatif konstan, karena ada sedikit variasi dalam permintaan daya selama operasi, dibandingkan dengan peralatan siklik (Klanfar et al., 2016). Faktor beban nilai 1.0 menunjukkan bahwa item peralatan beroperasi pada tingkat tenaga kuda bertingkat penuh, yang umumnya tidak tercapai. Faktor beban sangat bervariasi tergantung pada bagaimana peralatan dioperasikan berdasarkan karakteristik aplikasi dan kondisi lapangan. Periode yang dihabiskan di perjalanan *idle*, dozer, dan pusher secara terbalik, unit angkut yang bepergian kosong, manuver dekat pada throttle bagian, dan pengoperasian menurun adalah contoh kondisi yang mengurangi faktor beban. Jam operasi dalam model biasanya diperkirakan berdasarkan tingkat produksi rata-rata (Zhang, 2015). Tabel 2.3. mencantumkan faktor beban yang diberikan oleh berbagai sumber.

**Tabel 2. 3 Faktor Beban Peralatan Aspal dari Berbagai Sumber**

<i>Asphalt paver</i>	<i>Truck</i>	<i>Roller</i>	Referensi
0.59	0.59	0.59	US EPA (2004)
0.2-0.3 (rendah)	0.2-0.3 (rendah)	0.3-0.5 (rendah)	Caterpillar (2010)
0.3-0.4 8 (sedang)	0.3-0.4 8 (sedang)	0.5-0.8 (sedang)	
0.4-0.5 (tinggi)	0.4-0.5 (tinggi)	0.8-1.0 (tinggi)	
0.25-0.75	0.25-0.75	0.25-0.75	Filas (2002)
40	40	40	Persson and Kindbom (1999)
40	40	40	Flodström et al. (2004)

sumber: Zhang, 2015

Sebagai contoh, penelitian Lewis dan Hajji (2012) menggunakan faktor beban mesin sebesar 0,59 untuk bulldozer. Namun, faktor muatan mesin aktual dapat sangat bervariasi dari nilai tersebut, sehingga dapat memengaruhi estimasi emisi untuk jenis peralatan tertentu (Lewis and Hajji, 2012).

### 2.11.5. Model Prediksi Konsumsi Energi Konstruksi Permukaan Aspal

Berdasarkan teori perhitungan *Life Cycle Analysis* (LCA), kondisi batas konsumsi energi lapisan permukaan aspal dapat ditentukan melalui empat bagian, yaitu: konsumsi energi produksi campuran aspal, konsumsi energi transportasi, konsumsi energi penghamparan, dan konsumsi energi pemadatan aspal (Zheng et al., 2019). Untuk menghitung total konsumsi energi dari campuran aspal, perlu ditetapkan standar keseragaman. Dalam penelitian (Zheng et al., 2019) nilai kalor bersih digunakan untuk menghitung konsumsi energi, sedangkan koefisien emisi karbon digunakan untuk menghitung emisi karbon. Informasi lebih lanjut dapat dilihat pada Tabel 2.4 di bawah ini.

**Tabel 2. 4 Nilai Kalor dan Koefisien Emisi Karbon dari Berbagai Sumber Energi**

Tipe Bahan Bakar	Koefisien Emisi Karbon	Satuan	Koefisien Pemanasan	Satuan
Minyak berat	2.9	kg/l	35.8	MJ/l
Solar	2.7	kg/l	36.7	MJ/l
Bensin	2.2	kg/l	32.6	MJ/l
Minyak tanah	2.5	kg/l	35.5	MJ/l
Gas alam	2.1	kg/m <sup>3</sup>	51.4	MJ/m <sup>3</sup>
Batubara standar	2.6	kg/Kg	21.9	MJ/kg
Energi listrik	0.69	kg/kw.h	3.6	MJ/kw.h

sumber : Z. Zhang *et al.*, 2019

Dari produksi hingga proses konstruksi, campuran aspal perlu dikonsumsi beragam sumber energi. Konsumsi energi setiap tahap harus dihitung. Rumus perhitungan untuk konsumsi energi konstruksi lapisan permukaan aspal:

$$\sum EC = EC_{lqtt} + EC_{jldf} + EC_{jlhg} + EC_{bhjd} + EC_{ys} + EC_{tp} + EC_{ny}$$

$$EC_{lqtt} = 1422.4m_{lq}$$

$$EC_{jldf} = 7.1m_{jl}$$

$$EC_{jlhg} = 257.5m_{jl}$$

$$EC_{bhjd} = 10.3m_{hhl}$$

$$EC_{ys} = 1.8m_{hhl}h$$

$$EC_{tp} = 10V_{hhl}$$

$$EC_{ny} = 35.9V_{hhl} \dots\dots\dots(2.12)$$

dimana :

- EC<sub>lqtt</sub> = Konsumsi energi untuk pemanasan aspal (MJ)
- m<sub>lq</sub> = Kualitas aspal (kg)

- EC<sub>jilhg</sub> = Konsumsi energi untuk pengeringan dan pemanasan agregat (MJ)
- EC<sub>bljhd</sub> = Konsumsi energi untuk pencampuran elektromekanis (MJ)
- m<sub>lqhhhl</sub> = Kualitas campuran aspal (t)
- EC<sub>ys</sub> = Konsumsi energi untuk transportasi (MJ)
- h = Jarak rata-rata (km)
- EC<sub>tp</sub> = konsumsi energi untuk penghamparan campuran aspal (MJ)
- V<sub>hhhl</sub> = Volume campuran aspal yang dipadatkan (m<sup>3</sup>)
- EC<sub>ny</sub> = Konsumsi energi proses pemadatan campuran aspal (kg)

**2.11.6. Penilaian Konsumsi Energi dari Konstruksi Sistem Struktur Bangunan di Lokasi**

Metode yang digunakan untuk mengestimasi konsumsi energi dan emisi pada tahap ereksi/konstruksi didasarkan pada jam kerja peralatan (Zhou and Rezazadeh Azar, 2019), dapat dihitung menggunakan Persamaan berikut:

$$\sum E_i = \sum T_i \cdot ECF_i, \dots\dots\dots(2.13)$$

dimana:

- E<sub>i</sub> = penggunaan energi selama jam kerja peralatan i
- T<sub>i</sub> = jam kerja peralatan i
- ECF<sub>i</sub> = faktor konsumsi energi dari peralatan yang dipilih (MJ/h)

Tingkat konsumsi bahan bakar untuk setiap peralatan (yaitu liter bahan bakar yang digunakan per jam mesin) diperkirakan menggunakan Persamaan yang diadopsi dari Organisasi Pangan dan Pertanian (FAO), yang disajikan dalam Persamaan 2.14 (FAO, 2017) berikut ini:

$$LMPH = \frac{K \times GHP \times LF}{KPL}, \dots\dots\dots(2.14)$$

dimana:

- LMPH = banyaknya bahan bakar yang digunakan per jam mesin dalam liter
- K = bahan bakar yang dikonsumsi per hp/jam (in kg)
- GHP = tenaga kuda kotor mesin

LF = faktor beban (dalam persen)

KPL = kepadatan bahan bakar dalam kg/liter dapat dilihat pada Tabel 2.5 berikut ini.

**Tabel 2. 5 Berat dan Tingkat Konsumsi Bahan Bakar serta Faktor Beban untuk Mesin Diesel dan Bensin**

Mesin	Berat (KPL) (kg/liter)	Konsumsi bahan bakar (K) (kg/brake hp-hour)	Faktor beban (LF)		
			Rendah	Sedang	Tinggi
Gasoline	0.72	0.21	0.38	0.54	0.70
Diesel	0.84	0.17	0.38	0.54	0.70

sumber: (Zhou and Rezazadeh Azar, 2019)

Menurut faktor konversi energi dan emisi diesel dan bensin, konsumsi energi dan emisi dihitung seperti yang ditunjukkan dalam Persamaan 2.15 berikut ini:

$$ECF = LPMH \times \text{Energy conversion factor} \dots \dots \dots (2.15)$$

dimana:

ECF = faktor konsumsi energi

faktor konsumsi energi (*energy conversion factor*) didapatkan dari Tabel *stationary fuel combustion* yang dikeluarkan oleh Ministry of Environment (Strategy, 2014) yaitu sebagai berikut:

**Tabel 2. 6 Faktor Emisi Pembakaran Bahan Bakar Stasioner (GJ)**

(1) Fuel Type	(2) Energy Conversion Factor	Emission Factor (kg/ GJ)					(7) <sup>c</sup> CO <sub>2e</sub>
		(3) Bio CO <sub>2</sub>	(4) CO <sub>2</sub>	(5) CH <sub>4</sub>	(6) N <sub>2</sub> O		
Natural Gas	0.03885 GJ/ m <sup>3</sup>	-	49.58	0.0010	0.0009	49.87	
Propane	0.02531 GJ/ L	-	59.86	0.0009	0.0043	61.15	
Light Fuel Oil	0.03880 GJ/ L	2.77	68.12	0.0007	0.0008	68.37	
Heavy Fuel Oil	0.04250 GJ/L	-	74.26	0.0013	0.0015	74.74	
Kerosene	0.03768 GJ/ L	-	67.94	0.0007	0.0008	68.20	
Diesel Fuel	0.03830 GJ/ L	2.77	67.43	0.0035	0.0104	70.62	
Marine Diesel	0.03830 GJ/L	2.77	67.43	0.0065	0.0019	68.16	
Gasoline	0.03500 GJ/ L	3.22	62.86	0.0771	0.0014	65.22	
Wood Fuel – Industrial (50% moisture)	0.00900 GJ/ kg	93.33	-	0.0100	0.0067	2.24	
Wood Fuel – Residential (0% moisture)	0.01800 GJ/ kg	82.11	-	.6833	.0067	19.07	
Ethanol (E100)	0.02342 GJ/L	64.43	-	a	a	a	
Biodiesel (B100)	0.03567 GJ/L	69.36	-	b	b	b	
Renewable Natural Gas	0.03885 GJ/ m <sup>3</sup>	49.58	-	0.0010	0.0009	0.29	

<sup>a</sup> Gasoline CH<sub>4</sub> and N<sub>2</sub>O emission factors (by mode and technology) are used for ethanol.  
<sup>b</sup> Diesel CH<sub>4</sub> and N<sub>2</sub>O emission factors (by mode and technology) are used for biodiesel.  
<sup>c</sup> The CO<sub>2e</sub> values in column (7) exclude Bio CO<sub>2</sub>.

sumber: Strategy, 2014

Waktu Kerja Peralatan (T)

Langkah selanjutnya adalah memperkirakan jam kerja peralatan yang dibutuhkan. Waktu kerja peralatan adalah waktu siklus yaitu waktu yang diperlukan oleh peralatan untuk melakukan satu siklus pekerjaan, waktu siklus didapat dari *Cycle Time Estimating Charts* yang dikeluarkan oleh produsen alat berat, contohnya dari *Caterpillar Performance Handbook* dan dari *Specifications and Application Handbook of Komatsu*.

## **2.12. Penelitian Terdahulu**

Penelitian terdahulu dibagi menjadi empat sub yaitu: pertama penelitian mengenai konsumsi energi dan emisi pada pekerjaan konstruksi jalan, kedua penelitian yang menggunakan metode *Life Cycle Assessment* (LCA) dengan beberapa *system boundary* yang berbeda untuk menghitung energi dan emisi, dan yang ketiga penelitian mengenai *Life Cycle Cost Analysis* (LCCA) dan yang ke empat penelitian mengenai metode prediksi nilai *International Roughness Index* (IRI).

### **2.12.1. Konsumsi Energi dan Emisi pada Pekerjaan Konstruksi Jalan**

Penelitian-penelitian ini dilakukan di beberapa negara seperti di Singapura, Amerika Serikat, Chile, Swedia, Croasia dari tahun 1993 sampai dengan tahun 2020 setidaknya ada 18 penelitian, dapat dilihat pada Lampiran 1 Tabel A Penelitian Konsumsi Energi dan Emisi pada Pekerjaan Konstruksi Jalan. Penelitian tersebut dikelompokkan menjadi 5 yaitu: pertama, menemukan korelasi antara faktor peralatan khususnya AMP dan dampaknya terhadap konsumsi energi (Ang et al., 1993; Chong et al., 2016; Androjić and Alduk, 2016; Androjić and Dolaček-Alduk, 2018; Huang et al., 2019; Androjić et al., 2020). Kedua, membandingkan jumlah energi yang dibutuhkan untuk membuat aspal berdasarkan jenis campuran aspal dan suhu campuran aspal (Thenoux et al., 2007; Zaumanis et al., 2012). Ketiga, membandingkan jumlah energi dan emisi antara jalan dengan perkerasan lentur dan perkerasan kaku pada beberapa tahap siklus proyek (Zapata and Gambatese, 2005; Krantz et al., 2015; Li and Wang, 2016; Thives and Ghisi, 2017; Mulyana and Wirahadikusumah, 2017). Keempat, membuat model untuk memprediksi jumlah energi alat berat dalam penggalian dan pengangkut massa (Jassim et al., 2016; Jassim et al., 2017; Jassim et al., 2018; Jassim, Hassanean S. H, Weizhuo Lu, 2018). Kelima, mencari alternatif dan terobosan dari penggunaan bahan (material

baru) dan metode baru misalnya campuran aspal hangat, untuk mengurangi konsumsi energi dan emisi yang dihasilkan oleh konstruksi jalan proyek (Wang et al., 2018).

### **2.12.2. Life Cycle Assessment (LCA)**

Terdapat sedikitnya 70 penelitian yang telah dilakukan dari beberapa negara yang dimulai dari tahun 1984 sampai dengan tahun 2024 yang menggunakan metode *Life Cycle Assessment* (LCA) untuk menghitung energi baik yang berbasis proses, *input-output*, maupun gabungan keduanya yaitu *hybrid*. Kebanyakan penelitian yang berbasis proses menggunakan data inventori yang telah tersedia pada *software* perhitungan maupun *database* dari beberapa sumber, untuk menghitung energi yang dikonsumsi dan emisi yang dihasilkan. Lebih jelas dapat dilihat pada Lampiran 2 Tabel B Penelitian Mengenai Energi dan Emisi pada Perkerasan Jalan Menggunakan Metode *Life Cycle Assessment* (LCA). Beberapa penelitian terdapat keterbatasan antara lain :

- a. Penelitian yang dilakukan oleh Roudebush, (1996) menghitung energi pada tahap produksi material, tahap konstruksi dan *end of life* namun tidak menghitung energi pada tahap operasi dan *maintenance, removal, recycling* dan *disposal*.
- b. Penelitian yang dilakukan oleh Horvath and Hendrickson, (1998) menghitung energi pada tahap produksi material, tahap konstruksi dan *end of life* namun tidak menghitung energi pada tahap operasi dan *maintenance, removal, recycling* dan *disposal*.
- c. Penelitian yang dilakukan oleh Zapata and Gambatese, (2005) menghitung energi pada tahap produksi material dan tahap konstruksi namun ada keterbatasan yaitu tidak menghitung konsumsi energi pada tahap *maintenance, removal, recycling* dan *disposal*.
- d. Penelitian yang dilakukan oleh Kim et al. (2012) pada tahap konstruksi, namun tidak menghitung energi pada tahap produksi material, tahap operasi, tahap *maintenance* dan *end of life, removal, recycling* dan *disposal*.

Terdapat beberapa penelitian yg sudah dilakukan untuk menghitung energi pada tahap operasi dan pemeliharaan dengan cara mengasumsi faktor/parameter atau jenis penanganan (pekerjaan) secara langsung seperti :

- a. Penelitian yang dilakukan oleh Häkkinen and Mäkelä, (1996) untuk menghitung dampak lingkungan (*enviromental burden*) salah satunya *output*-nya energi pada

semua tahap, termasuk tahap pemeliharaan dengan mengasumsikan *traffic* selama 50 tahun akan dilewati kendaraan sebanyak 20000 kendaraan/hari.

- b. Penelitian yang dilakukan oleh Mroueh et al., (2000) menggunakan asumsi yang sama dengan yang dilakukan oleh Häkkinen and Mäkelä, (1996). Dalam studi kasus teoritis ini, tidaklah mungkin untuk menentukan pengaruh struktur dan bahan-bahan struktural pada pemeliharaan jalan, dan dengan demikian kalkulasinya terbatas pada hanya satu alternatif perawatan, yang menggambarkan kontribusi pemeliharaan jalan terhadap total siklus hidup pemuatan konstruksi.
- c. Penelitian yang dilakukan oleh Stripple (2001) menghitung energi pada tahap pemeliharaan yang diakibatkan volume lalu lintas(*traffic*) dengan mengasumsikan selama 40 tahun akan dilewati kendaraan sebanyak 5000 kendaraan/hari
- d. Penelitian yang dilakukan oleh Park et al., (2003), periode perbaikan aspal diasumsikan dilakukan pada tahun ke 7, dan masa hidup, 20 tahun, data didapatkan dari kuesioner, diisi oleh para ahli dari organisasi terkait. Diasumsikan bahwa jalan aspal diperbaiki dengan melakukan *milling-overlay* setiap tujuh tahun sekali, dan diaspal kembali (*repaved*) setiap 20 tahun setelah dua kali diperbaiki /*di-overlay*.
- e. Penelitian yang dilakukan oleh Meil, (2006) tidak menghitung energi selama tahap *maintenance* karena pertama, dianggap kecil dan tidak berpengaruh secara signifikan, kedua sulit mengestimasi frekuensi dan jenis penanganan selama *maintenance*, karena sangat tergantung pada lokasi dan kondisi cuaca, namun untuk energi rehabilitasi jalan diperhitungkan. Pada perkerasan kaku dilakukan rehabilitasi pada tahun ke-20 dan ke-35 tahun dengan pekerjaan *diamond grinding*, dan *load transfer restoration* pada tahun ke-35, dan pada umur ke-40 dilakukan *overlay asphalt concrete* dengan tebal 80 mm. Pada perkerasan lentur dilakukan *overlay* pada tahun ke-18 dan tahun ke-35, dengan cara mengasumsikan pekerjaan mengupas lapisan aspal lama dengan tebal 40 mm kemudian menggantikannya dengan aspal baru setebal 50 mm pada tahun ke-18. Kemudian *overlay* kedua dilakukan pada tahun ke-35 dengan mengasumsikan pekerjaan mengupas aspal eksisting dengan tebal 80 mm dan menggantikannya dengan aspal baru dengan tebal 100 mm.
- f. Penelitian yang dilakukan oleh Chan, (2007) menghitung penggunaan energi pada tahap pemeliharaan dengan cara mengumpulkan data biaya konstruksi dan

pemeliharaan aktual dari kontrak konstruksi final, sementara jadwal perawatan aktual diperoleh dari basis data yang dikelola oleh staf *Michigan Departemen Of Transportation* (MDOT). Kejadian aktual dari perawatan di beberapa ruas jalan secara kasar mengikuti perkiraan jadwal, namun prosedur perawatan yang sebenarnya dilakukan (mis. *micro-surfacing, joint repair*) agak berbeda dari perkiraan. Jadi pada intinya perhitungan energi pada tahap pemeliharaan mengikuti pola pekerjaan yang dilakukan pada ruas jalan yang menjadi objek penelitian dengan mempelajari data historis pemeliharaan jalan yang sebelumnya sudah dilakukan.

- g. Penelitian yang dilakukan oleh Wang et al., (2019) menghitung emisi karbon dioksida (CO<sub>2</sub>) untuk pekerjaan preservasi perkerasan aspal pada tahap konstruksi dan tahap penggunaan, prediksi menggunakan *Motor Vehicle Emission Simulator* (MOVES) dan model kekasaran perkerasan IRI yang diperoleh dari program *Long Term Pavement Performance* (LTPP). Penelitian ini hanya mempertimbangkan efek dari parameter lalu lintas dan kondisi permukaan perkerasan pada emisi kendaraan yang digunakan pada tahap penggunaan (*operation*) bukan disebabkan oleh penggunaan material dan peralatan pada saat pelaksanaan konstruksi pekerjaan pemeliharaan, karena ada model yang tersedia untuk mengukur efek tersebut. Pekerjaan yang diaplikasikan adalah *thin overlay, chip seal, dan crack seal*.

### **2.12.3. Life Cycle Cost Analysis (LCCA)**

*Life Cycle Cost Analysis* (LCCA) atau Analisis Biaya Siklus Hidup adalah sebuah metode analisis yang digunakan untuk mengevaluasi biaya total suatu produk, sistem, atau proyek dari awal hingga akhir masa pakai atau siklus hidupnya. LCCA adalah metode evaluasi yang digunakan untuk menilai manfaat ekonomi dari alternatif-alternatif investasi (Suwanto et al., 2023). LCCA melibatkan perhitungan dan analisis biaya selama siklus hidup suatu produk, sistem atau proyek, mulai dari tahap perencanaan, perancangan, konstruksi, pengoperasian, pemeliharaan, hingga pembongkaran (Rao Rangaraju et al., 2008; Emin and Bagdatli, 2021). Dengan mempertimbangkan biaya selama seluruh siklus hidup, LCCA membantu mengoptimalkan keputusan pengelolaan sumber daya dan investasi dengan mempertimbangkan aspek ekonomi jangka panjang. LCCA sangat berguna dalam

pengambilan keputusan di bidang konstruksi, teknologi informasi, energi, transportasi, dan lingkungan. Metode ini dapat membantu menentukan alternatif terbaik dalam pemilihan material, desain, dan strategi pemeliharaan untuk mencapai nilai terbaik bagi suatu produk, sistem, atau proyek (Beatty, 2002; Abdollahi et al., 2020).

Penggunaan LCCA dalam mengevaluasi proyek konstruksi jalan sangat penting untuk mempertimbangkan biaya selama seluruh siklus hidup jalan tersebut. LCCA dapat membantu dalam memilih alternatif terbaik antara perkerasan lentur dan perkerasan kaku. Pertimbangan biaya selama siklus hidup perlu diperhatikan untuk mengevaluasi kedua alternatif tersebut. Biaya selama siklus hidup mencakup biaya konstruksi, pemeliharaan, perbaikan, dan penggantian. Dalam hal ini, LCCA dapat digunakan untuk menentukan alternatif perkerasan jalan yang paling ekonomis dengan mempertimbangkan biaya selama siklus hidup yang terkait dengan kedua jenis perkerasan (Babashamsi et al., 2016). Perkerasan lentur dan kaku adalah jenis perkerasan jalan yang berbeda dalam karakteristik dan performanya. Perkerasan lentur terdiri dari aspal dan bahan granular seperti kerikil dan pasir, sementara perkerasan kaku terdiri dari beton. Kedua jenis perkerasan memiliki kelebihan dan kekurangan yang perlu dipertimbangkan, terutama dalam aspek biaya. Perkerasan lentur memiliki daya lentur yang baik dan mampu menahan beban kendaraan dengan baik. Sedangkan perkerasan kaku memiliki kekuatan tekan yang baik dan terdiri dari beton yang ditempatkan di atas lapisan bawah yang sama dengan perkerasan lentur (Khade and Wuppulluri, 2016; Taher et al., 2020).

*Life Cycle Cost Analysis* (LCCA) adalah metode analisis yang penting dalam industri konstruksi karena mampu memberikan pandangan yang lebih holistik mengenai biaya selama siklus hidup sebuah proyek. Dalam kasus konstruksi jalan, LCCA dapat membantu pengambilan keputusan antara perkerasan lentur dan perkerasan kaku dengan mempertimbangkan biaya selama seluruh siklus hidup (Salah et al., 2021). Metode LCCA dapat dilakukan dengan menggunakan perangkat lunak khusus yang dapat membantu dalam mengidentifikasi elemen biaya dan menghitung biaya selama siklus hidup. Salah satu contoh perangkat lunak yang digunakan untuk menghitung LCCA adalah *Federal Highway Administration's Real Cost*, yang digunakan oleh Departemen Transportasi Amerika Serikat untuk mengevaluasi biaya selama siklus hidup proyek

konstruksi jalan (State of California Department of Transportation, 2013; Kedarisetty et al., 2022). Berikut adalah langkah-langkah umum untuk menghitung LCCA:

- a. Identifikasi alternatif desain atau strategi: Langkah pertama adalah mengidentifikasi alternatif desain atau strategi yang akan dievaluasi dalam analisis biaya selama siklus hidup. Misalnya, dalam konteks proyek konstruksi jalan, alternatif desain dapat mencakup penggunaan perkerasan beton atau perkerasan aspal, atau penggunaan bahan yang berbeda untuk lapisan permukaan jalan.
- b. Identifikasi elemen biaya: Setelah alternatif desain atau strategi telah diidentifikasi, langkah selanjutnya adalah mengidentifikasi elemen biaya yang akan dianalisis selama siklus hidup. Elemen biaya ini dapat mencakup biaya konstruksi, biaya operasi dan pemeliharaan, biaya perbaikan, biaya penggantian, dan biaya penghapusan. Dalam konteks proyek konstruksi jalan, elemen biaya dapat mencakup biaya konstruksi awal, biaya pemeliharaan rutin seperti penggantian lapisan permukaan jalan, biaya perbaikan akibat kerusakan, dan biaya penghapusan akhir ketika jalan harus diganti.
- c. Menghitung biaya selama siklus hidup: Setelah elemen biaya telah diidentifikasi, langkah selanjutnya adalah menghitung biaya selama siklus hidup untuk masing-masing alternatif desain atau strategi. Biaya selama siklus hidup mencakup biaya awal dan biaya selama operasi, pemeliharaan, perbaikan, penggantian, dan penghapusan. Biaya selama siklus hidup dihitung dalam nilai sekarang, yaitu total biaya yang diharapkan untuk seluruh umur proyek dalam nilai dolar saat ini.
- d. Menganalisis hasil: Setelah biaya selama siklus hidup telah dihitung untuk masing-masing alternatif desain atau strategi, langkah terakhir adalah menganalisis hasil dan memilih alternatif yang paling efisien secara ekonomi. Hal ini dapat melibatkan membandingkan biaya selama siklus hidup untuk masing-masing alternatif desain atau strategi, dan mengevaluasi faktor-faktor lain seperti faktor lingkungan, kelayakan teknis, dan faktor sosial untuk membuat keputusan akhir.

Dalam LCCA, biaya dikonversi menjadi nilai sekarang atau nilai masa depan dengan memperhitungkan faktor waktu dan suku bunga diskon.

Rumus umum untuk menghitung LCCA adalah sebagai berikut:

$LCCA = Present\ Worth\ of\ Initial\ Costs + Present\ Worth\ of\ Ongoing\ Costs + Present\ Worth\ of\ Salvage\ Value$

dimana:

*Present Worth of Initial Costs* = nilai sekarang dari biaya awal, termasuk perencanaan, desain, konstruksi, dan pengadaan peralatan dan bahan.

*Present Worth of Ongoing Costs* = nilai sekarang dari biaya yang diharapkan selama siklus hidup fasilitas, termasuk operasi, pemeliharaan, dan perbaikan.

*Present Worth of Salvage Value* = nilai sekarang dari nilai sisa fasilitas setelah siklus hidupnya berakhir, seperti nilai tanah atau bahan yang dapat didaur ulang.

Dalam perhitungan LCCA, biaya dihitung dalam bentuk nilai sekarang dengan memperhitungkan faktor diskon untuk mencerminkan nilai waktu uang. Faktor diskon didasarkan pada suku bunga yang digunakan untuk memperhitungkan nilai waktu uang. Pada dasarnya, LCCA membantu dalam memperkirakan biaya sepanjang siklus hidup suatu proyek atau fasilitas, dan membantu dalam pengambilan keputusan tentang desain, bahan, dan operasi yang paling ekonomis dan berkelanjutan.

Penghitungan LCCA dapat diterapkan pada investasi pembangunan jalan raya, misalnya terdapat dua alternatif material konstruksi yaitu beton portland (*Portland cement concrete pavement/PCCP*) dan aspal panas campuran (*hot-mix asphalt/HMA*) untuk digunakan pada jalan raya. Untuk menghitung LCCA, perlu dikumpulkan data biaya dan umur pakai dari masing-masing alternatif material, sebagai contoh:

- a. Biaya pembangunan jalan raya menggunakan PCCP sebesar \$5 juta dan umur pakainya selama 40 tahun, sedangkan biaya pembangunan jalan raya menggunakan HMA sebesar \$4,8 juta dan umur pakainya selama 30 tahun.
- b. Selanjutnya, biaya pemeliharaan PCCP selama 40 tahun sebesar \$2 juta, sedangkan biaya pemeliharaan HMA selama 30 tahun sebesar \$1,8 juta.
- c. Biaya operasi dan pemeliharaan jalan raya setiap tahunnya menggunakan PCCP sebesar \$300.000, sedangkan menggunakan HMA sebesar \$350.000.

- d. Dalam penghitungan LCCA, biaya dari masing-masing alternatif material dikalkulasi dengan menggunakan faktor diskon yang ditetapkan, yang akan memperhitungkan nilai waktu uang dalam rangka membandingkan nilai biaya pada masa depan dengan nilai biaya pada saat ini. Misalnya, jika faktor diskon sebesar 5% dan umur pakai jalan raya selama 40 tahun, maka biaya pemeliharaan pada tahun ke-20 akan memiliki nilai diskon sebesar \$0,21 juta.
- e. Setelah semua biaya terkumpul, maka dapat dilakukan perhitungan LCCA. Perhitungan ini akan menghasilkan nilai biaya total masing-masing alternatif material dari awal pembangunan sampai dengan umur pakainya habis, yang akan memberikan gambaran mengenai total biaya yang harus dikeluarkan dan membantu dalam pengambilan keputusan investasi jalan raya yang lebih efektif dan efisien.

Beberapa penelitian terdahulu yang menggunakan metode dan *Life Cycle Cost Analysis* (LCCA) antara lain:

- a. Studi yang mengembangkan kerangka kerja LCCA stokastik untuk menganalisis biaya siklus hidup perkerasan jalan dengan memperhitungkan ketidakpastian biaya satuan dan mengevaluasi dampak perubahan iklim. Hasil penelitian menunjukkan bahwa perubahan iklim mempengaruhi biaya pemeliharaan, EOL, dan transportasi perkerasan jalan, serta meningkatkan akurasi biaya satuan bensin, solar, dan HMA untuk menilai biaya perkerasan jalan akibat perubahan iklim secara tepat (Qiao et al., 2023).
- b. Penggunaan jalan raya menyebabkan konsumsi energi/sumber daya yang besar dan emisi gas rumah kaca seperti CO<sub>2</sub>, PM, NO<sub>x</sub>, O<sub>3</sub>, karena permintaan tinggi untuk material baru terutama di wilayah berkembang. Namun, penggunaan material daur ulang seperti *Reclaimed Asphalt Pavement* (RAP) dan pendekatan alternatif lainnya seperti *Warm-Mix Asphalt* (WMA) di negara maju terhambat oleh kendala proyek-spesifik dan kurangnya studi empiris di daerah tersebut. Studi evaluasi siklus hidup pada penggunaan material jalan alternatif ini dari proyek-proyek aktual di negara berkembang dapat membantu pengambil keputusan memilih pendekatan material yang berkelanjutan dengan memberikan contoh studi kasus sebagai panduan. Sebuah studi kasus dilakukan dengan menganalisis dampak lingkungan pada beberapa pendekatan seperti RAP dan WMA pada jalan raya utama di Abu Dhabi selama 30 tahun. Hasil studi menunjukkan bahwa WMA lebih bermanfaat dibandingkan

penggantian aspal baru dengan aspal daur ulang (25% RAP aspal dasar, 15% RAP pengikat dan lapisan aus) karena mampu mengurangi penggunaan lahan dan konsumsi energi secara signifikan serta pengurangan emisi PM, penyusutan ozon, radiasi ionisasi, asidifikasi dan potensi pemanasan global pada semua tahap siklus hidup. Hasil ini menunjukkan pentingnya penggantian HMA dengan WMA dalam proyek jalan raya, terutama dalam mega proyek jalan raya di Abu Dhabi dan Timur Tengah untuk mengurangi dampak jejak karbon yang signifikan dari perkerasan aspal (Hasan et al., 2022).

- c. Sebuah studi kasus yang dilakukan di Lahore–Islamabad menggunakan *Life Cycle Cost Analysis* (LCCA) ditemukan bahwa penggunaan *Reclaimed Asphalt Pavement* (RAP) sebagai alternatif yang lebih murah untuk *Hot Mix Asphalt* (HMA) dalam konstruksi dan perawatan jalan aspal. Namun, penggunaan HMA dengan kandungan RAP yang tinggi (misalnya 40%) dapat memberikan efek buruk pada siklus hidup, sifat kinerja, dan biaya terkait. Oleh karena itu, penelitian ini dilakukan untuk mengevaluasi kelayakan ekonomi penggunaan RAP dalam kondisi iklim lokal dengan mempertimbangkan kinerja siklus hidup. Sebuah studi kasus dilakukan menggunakan 20% RAP, dan hasil analisis menunjukkan bahwa penggunaan RAP dapat mengurangi biaya total siklus hidup hingga 14% dibandingkan dengan bahan konvensional. Selain itu, pembuatan kedua jenis bahan (HMA konvensional dan RAP) dilakukan di pabrik manufaktur yang berbeda, dan dalam analisis perbedaan biaya antara dua pabrik manufaktur yang dipilih untuk bahan konvensional dan RAP, ditemukan pengurangan biaya hingga 57% untuk pabrik manufaktur RAP. Selain itu, tidak ditemukan perbedaan biaya pada tahap lain seperti tenaga kerja, transportasi bahan, dan aktivitas konstruksi, karena prosedur dan jenis mesin yang digunakan sama. Studi ini juga mengevaluasi dampak karbon dioksida dan biaya terkait, dengan mempertimbangkan emisi dari transportasi dan mesin, namun emisi dari operasi pabrik diabaikan karena data tidak tersedia (Rafiq et al., 2021).
- d. Otoritas jalan Afrika Selatan telah menggunakan analisis biaya siklus hidup (LCCA) untuk mengurangi biaya konstruksi jalan, biaya operasional kendaraan serta kecelakaan lalu lintas sekaligus meningkatkan kinerja jalan untuk meningkatkan keberlanjutan infrastruktur perkerasan jalan. Namun, penilaian siklus hidup (LCA) perlu dilakukan untuk mempertimbangkan dampak lingkungan dan sosial dari

penyediaan infrastruktur perkerasan jalan. Oleh karena itu, sebuah kerangka kerja untuk pengembangan model LCA disarankan dengan mendokumentasikan inventarisasi siklus hidup (LCI) untuk material perkerasan jalan dan aktivitas konstruksi yang umum. LCI ini bertindak sebagai blok bangunan untuk LCA dengan mengevaluasi aliran primer yang terkait dengan rantai pasok bahan perkerasan jalan dan aktivitas konstruksi di Afrika Selatan. Contoh kerja disediakan untuk mendemonstrasikan implementasi LCI, pendekatan ini diharapkan dapat berfungsi sebagai versi pertama dari protokol hidup yang akan disempurnakan melalui penelitian lebih lanjut (Blaauw and Maina, 2021).

- e. Penelitian dalam konteks pemeliharaan sistem perkerasan jalan di Cina, penggunaan LCCA diintegrasikan dengan LCA dan optimasi multi-tujuan untuk membangun sebuah sistem pengambilan keputusan yang mempertimbangkan kinerja, ekonomi, dan dimensi lingkungan. Metodologi ini melibatkan redefinisi ruang lingkup sistem dan unit proses, penetapan model dan parameter penilaian, penggunaan LCCA untuk mengkonversi jejak lingkungan menjadi biaya kerusakan lingkungan, dan optimasi pemrograman untuk mendapatkan jadwal pemeliharaan yang optimal. Studi kasus yang dilakukan menunjukkan bahwa biaya pengguna merupakan faktor dominan dalam pengambilan keputusan pemeliharaan, sedangkan dampak lingkungan relatif dapat diabaikan. Dalam mengoptimalkan pemrograman berbasis LCA, perpanjangan umur desain perkerasan menjadi faktor penting yang harus dipertimbangkan, sementara material dan konstruksi menjadi tahapan utama yang berpotensi untuk ditingkatkan. Melalui penggunaan model ini, industri perkerasan jalan di Cina dapat berkontribusi pada tujuan keberlanjutan dan pengambilan keputusan ilmiah (Huang et al., 2021).
- f. Studi kasus dilakukan untuk berbagai struktur jalan di Interstate 95 (I-95) di New Hampshire (NH), Amerika Serikat sebagai bahan investigasi dengan tujuan untuk menyelidiki apakah masih ekonomis untuk menggunakan perkerasan aspal reklamasi (RAP) dalam kondisi iklim setempat di masa mendatang, dengan mempertimbangkan kinerja siklus hidup. Perkerasan aspal reklamasi (RAP) telah digunakan secara luas dalam konstruksi dan pemeliharaan perkerasan aspal dan telah menunjukkan efektivitas biaya dibandingkan dengan aspal campuran panas (HMA). Namun, HMA dengan kandungan aspal reklamasi yang tinggi (RA) (misalnya, 40%)

terkadang digunakan dalam praktiknya, namun dapat memberikan dampak negatif yang signifikan terhadap kinerja siklus hidup dan biaya terkait. Tantangan khusus timbul karena kinerja siklus hidup RAP juga dipengaruhi oleh kondisi iklim setempat. Dalam studi kasus ini, hasil pengujian modulus dinamis digunakan untuk HMA lokal dan HMA dengan RA 40% (sebagai alternatif material utama) guna memprediksi kinerja siklus hidup struktur perkerasan jalan yang dipilih, dengan mempertimbangkan iklim di masa mendatang. Selanjutnya, LCCA dilakukan untuk memperkirakan dan membandingkan arus kas siklus hidup dari struktur jalan yang sedang diselidiki. Pemeliharaan responsif (dengan *overlay*) dan efektivitas juga diperhitungkan dalam penelitian ini. Hasil dari studi ini menunjukkan bahwa penggunaan 40% RA pada HMA dapat mengurangi biaya lembaga hingga sekitar 18% di bawah prediksi iklim pada periode 2020-2040. Oleh karena itu, New Hampshire perlu mempertimbangkan praktik ini di bawah prediksi iklim di masa depan guna mengurangi biaya lembaga (Qiao et al., 2019).

- g. Pembangunan perkerasan jalan dengan bahan limbah padat daur ulang telah menjadi topik keberlanjutan yang sangat penting belakangan ini, karena potensi manfaat lingkungan dan ekonomi yang terkandung di dalamnya. Sebuah tinjauan literatur yang difokuskan pada studi *Life Cycle Assessment* (LCA) dan *Life Cycle Cost Analysis* (LCCA) yang berkaitan dengan daur ulang limbah padat dalam pembangunan perkerasan jalan. Pertama-tama, berdasarkan studi yang ada, penggunaan sebagian besar bahan limbah padat daur ulang (seperti aspal daur ulang, slag baja, dan abu terbang batubara) dalam pembangunan perkerasan jalan dilakukan secara memuaskan dari sudut pandang lingkungan dan ekonomi, seperti yang termanifestasi dalam penurunan konsumsi energi, emisi gas rumah kaca, biaya, dan indikator lainnya. Namun, beberapa faktor, seperti jarak transportasi limbah padat daur ulang yang lebih panjang dan potensi pencucian logam berat, dapat menghambat daur ulang. Selain itu, perlu lebih memperhatikan fase penggunaan perkerasan jalan, prosedur alokasi, dan jarak transportasi limbah padat daur ulang, yang memiliki dampak signifikan pada hasil LCA. Dalam hal LCCA yang ada, pentingnya periode analisis dan tingkat diskon ditekankan dan indikator ekonomi yang paling praktis adalah Nilai Sekarang Bersih (NPV). Untuk studi masa depan, alokasi masih menjadi isu penting bagi studi LCA masa depan dan analisis

sensitivitas lebih lanjut dapat difokuskan pada pemilihan mode transportasi (dalam LCA), periode analisis dan tingkat diskon (dalam LCCA). Sementara itu, penelitian masa depan harus menekankan pada daur ulang limbah padat dalam proyek pemeliharaan dan rehabilitasi perkerasan jalan daripada konstruksi baru. Sebuah penilaian multi-kriteria yang mengintegrasikan LCA dan LCCA serta pertimbangan lainnya (seperti penilaian risiko yang lebih canggih) direkomendasikan untuk menentukan skenario daur ulang yang paling berkelanjutan (Li et al., 2019).

- h. Penggunaan bahan dan desain yang berkelanjutan sangat penting dalam pengembangan dan rehabilitasi jaringan jalan raya untuk menjaga keberlanjutan ekonomi dan lingkungan. Estimasi biaya siklus hidup proyek yang baik dan dampak lingkungan juga penting dalam proses pengambilan keputusan investasi jalan raya. Dalam konteks ini, dilakukan studi LCCA oleh *Colorado Department of Transportation* (CDOT) untuk membandingkan biaya siklus hidup dan studi LCA regional untuk mengevaluasi emisi gas rumah kaca (GRK) yang terkait dengan penggunaan beton semen Portland (PCCP) dan aspal campuran panas (HMA) pada proyek rekonstruksi jalan raya. Meskipun hasil LCCA menunjukkan desain yang setara, yaitu 7,4% lebih baik untuk HMA, studi LCA menunjukkan bahwa emisi GRK dari PCCP 26% lebih rendah daripada HMA selama periode analisis 40 tahun. Studi LCA dapat menjadi kriteria opsional untuk pemilihan tipe perkerasan awal. Namun demikian, studi LCCA CDOT tidak memperhitungkan biaya pengguna akibat kecelakaan dan non-pengguna. Oleh karena itu, diperlukan peningkatan dalam model analisis LCCA dan LCA untuk memperhitungkan faktor-faktor tambahan ini agar keputusan investasi jalan raya yang lebih berkelanjutan dapat dicapai (Liu et al., 2015).

#### **2.12.4. Model Prediksi Nilai International Roughness Index (IRI)**

*International Roughness Index* (IRI) adalah indeks yang paling populer digunakan untuk mengukur kekasaran permukaan jalan (Ali, et al., 2023), dikembangkan oleh Bank Dunia pada 1980-an, didefinisikan sebagai gerakan vertikal suspensi terakumulasi dibagi dengan jarak tempuh yang diperoleh dari model matematika seperempat mobil simulasi yang melintasi profil yang diukur pada 80 km/jam (ARA, 2004). Terdapat banyak agensi jalan raya di seluruh dunia menganggap nilai IRI awal (IRI tepat setelah

konstruksi) sebagai kriteria jaminan kualitas sementara IRI terminal (eksisting/saat ini) sebagai indikator tindakan pemeliharaan perkerasan yang diperlukan atau kebutuhan rekonstruksi (Perera and Kohn, 2002; Robbins and Tran, 2016). Salah satu penelitian terbaru yang dilakukan di Spanyol yaitu mengembangkan model kinerja IRI untuk jalan dua lajur dengan perkerasan fleksibel sampai kegiatan pemeliharaan dan/atau rehabilitasi pertama dilakukan dengan menggunakan model deterministik. Hasil yang didapat menunjukkan bahwa model regresi linier berganda mempunyai koefisien determinasi tertinggi, dengan variabel yang signifikan berupa umur perkerasan riil, berat lalu lintas berat kumulatif, dan tebal total lapisan perkerasan lentur (Pérez-Acebo et al., 2020). *Designer ME Pavement*, menganggap IRI terminal sebagai salah satu kriteria desain untuk perkerasan lentur dan kaku, sedangkan IRI awal adalah salah satu input utama yang diperlukan untuk melakukan desain (ARA, 2004). Model-model ini secara umum mengaitkan IRI dengan *pavement distresses*, kondisi lokasi, kondisi iklim, dan parameter struktural, seperti tingkat lalu lintas, ketebalan lapisan. Indeks berbasis *distress*, seperti kedalaman *rut* dan panjang retak, digunakan untuk menentukan waktu rehabilitasi atau umur layanan pelapisan perkerasan. Oleh karena itu, data kinerja berkualitas baik yang dipadukan dengan model kerusakan yang rasional dan akurat sangat penting untuk secara akurat menangkap total biaya hidup, konsumsi energi, dan emisi (Hong and Prozzi, 2018).

Secara umum, model prediksi nilai *International Roughness Index* (IRI) dibagi menjadi dua bagian besar menurut jenis perkerasannya yaitu: perkerasan kaku dan perkerasan lentur. Berdasarkan variabel independen, model prediksi ini dapat dikelompokkan menjadi dua yaitu: pertama berdasarkan karakteristik lalu lintas dan atau parameter struktur, dan kedua berdasarkan tekanan perkerasan dan atau kondisi *site* (Abdelaziz et al., 2020b). Model prediksi yang digunakan terdapat bermacam-macam metode seperti: menggunakan modelregresi linier maupun non linier, model teknik pembelajaran mesin seperti *Artificial Neural Network* (ANN) dan *Gene Expression Programming*. Adapun faktor atau parameter yang dipakai untuk memprediksi nilai IRI terdapat 7 (tujuh) jenis yaitu : umur jalan, nilai IRI awal, *distresses*, iklim, parameter tanah, lalu lintas dan parameter struktur. Lampiran 3 pada Tabel C Penelitian Model Prediksi *International Roughness Index* (IRI), memperlihatkan sebanyak 41 penelitian

yang telah dilakukan di beberapa negara seperti Amerika Serikat, Finlandia, Hungaria, Brazil, Mesir, India dan lain-lain.

Beberapa peneliti mengadopsi ANN sebagai teknik pemodelan dalam aplikasi perkerasan yang berbeda, seperti mengembangkan model saraf IRI untuk perkerasan kaku (El-Hakim and El-Badawy, 2013). Peneliti lain menggunakan ANN juga untuk mengembangkan model prediksi untuk modulus elastisitas tanah dasar (Park et al., 2009; Zaman et al., 2010; Elbagalati et al., 2017). Beberapa penelitian dilakukan untuk mengembangkan model prediksi untuk prediksi modulus dinamis aspal menggunakan ANN (Maryam Sadat Sakhaei Far et al., 2009; El-Badawy et al., 2016). Untuk mengetahui korelasi kekasaran perkerasan dengan kinerja struktural menggunakan ANN (Sollazzo et al., 2017). Sejumlah peneliti menggunakan ANN untuk memilih strategi pemeliharaan perkerasan dan menghitung ulang properti lapisan perkerasan (Abdelrahim and George, 2000; Saltan and Terzi, 2004; Gopalakrishnan et al., 2006; Ceylan et al., 2009; Saltan et al., 2012).

### **2.13. *Artificial Neural Network* (ANN)**

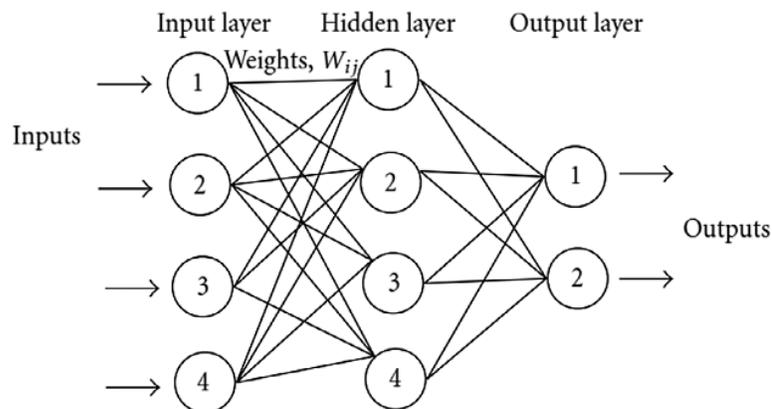
*Artificial Neural Network* (ANN) pertama kali diperkenalkan pada awal 1950-an oleh seorang psikolog bernama Donald Hebb, yang mempelajari efek belajar neuron di otak dan kemudian memperkenalkan mekanisme pelatihan sederhana yang disebut Hukum Hebb (Yadav et al., 2015). ANN adalah salah satu teknik pembelajaran mesin. Konsepnya terinspirasi dari biologi otak manusia dengan demikian; meniru perilaku otak (Priddy and Keller, 2005). Rosenblatt lebih jauh mengeksplorasi konsep ini dengan menghadirkan algoritma pelatihan perceptron, yang merupakan model matematika pertama yang cocok untuk simulasi komputer (Pollard, 1990). Pada tahun 1980, algoritma pelatihan *backpropagation* diperkenalkan, yang memberi para insinyur alasan untuk menjelajahi ANN sebagai alternatif yang cepat dan langsung untuk pemodelan matematika (Montavon et al., 2012). ANN memberikan solusi yang cukup akurat untuk mengembangkan model empiris untuk dataset yang kompleks dengan perilaku non-linear dan tidak cocok dengan fungsi matematika yang diketahui (Ceylan et al., 2014). ANN beroperasi dengan derajat paralelisme tinggi yang meniru otak manusia (Ye et al., 2014)

ANN paling cocok untuk aplikasi yang memiliki masalah kompleks dengan berbagai parameter. ANN telah menunjukkan kekuatannya untuk mendekati fungsi yang sangat nonlinier berdasarkan data input-output yang tersedia. Kemampuan perkiraan alat komputasi lunak ini adalah kekuatan pendorong utama, yang diilustrasikan oleh Persamaan (2.16) di bawah ini. Untuk setiap fungsi kontinu bernilai vektor yang diberikan  $g(x)$  didefinisikan pada serangkaian himpunan  $A \subset \mathbb{R}^n$  sedemikian rupa sehingga  $x \in A$  dan sembarang  $\epsilon > 0$ , terdapat fungsi  $f(x)$  sedemikian rupa sehingga Persamaan 2.16 sebagai berikut:

$$\sup_{x \in A} \|g(x) - f(x)\| < \epsilon \dots\dots\dots(2.16)$$

Secara jelas, persamaan ini menunjukkan kekuatan ANN dalam mendekati fungsi-fungsi nonlinier. Oleh karena itu sebagai contoh penggunaannya, pemodelan berbasis jaringan saraf memberikan alternatif alami untuk memprediksi IRI untuk perkerasan kaku berdasarkan data iklim dan lalu lintas yang tidak pasti, yang tersedia dari badan-badan lokal negara seperti *Departemen of Transportation (DOT)* (Hossain et al., 2020a).

Secara umum, ANN terdiri dari lapisan input (*input layer*), lapisan keluaran (*output layer*) dan sejumlah lapisan tersembunyi (*hidden layer*) (Abdualaziz Ali et al., 2023) di antaranya operasi-operasi canggih yang tidak linier dijalankan seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.12.

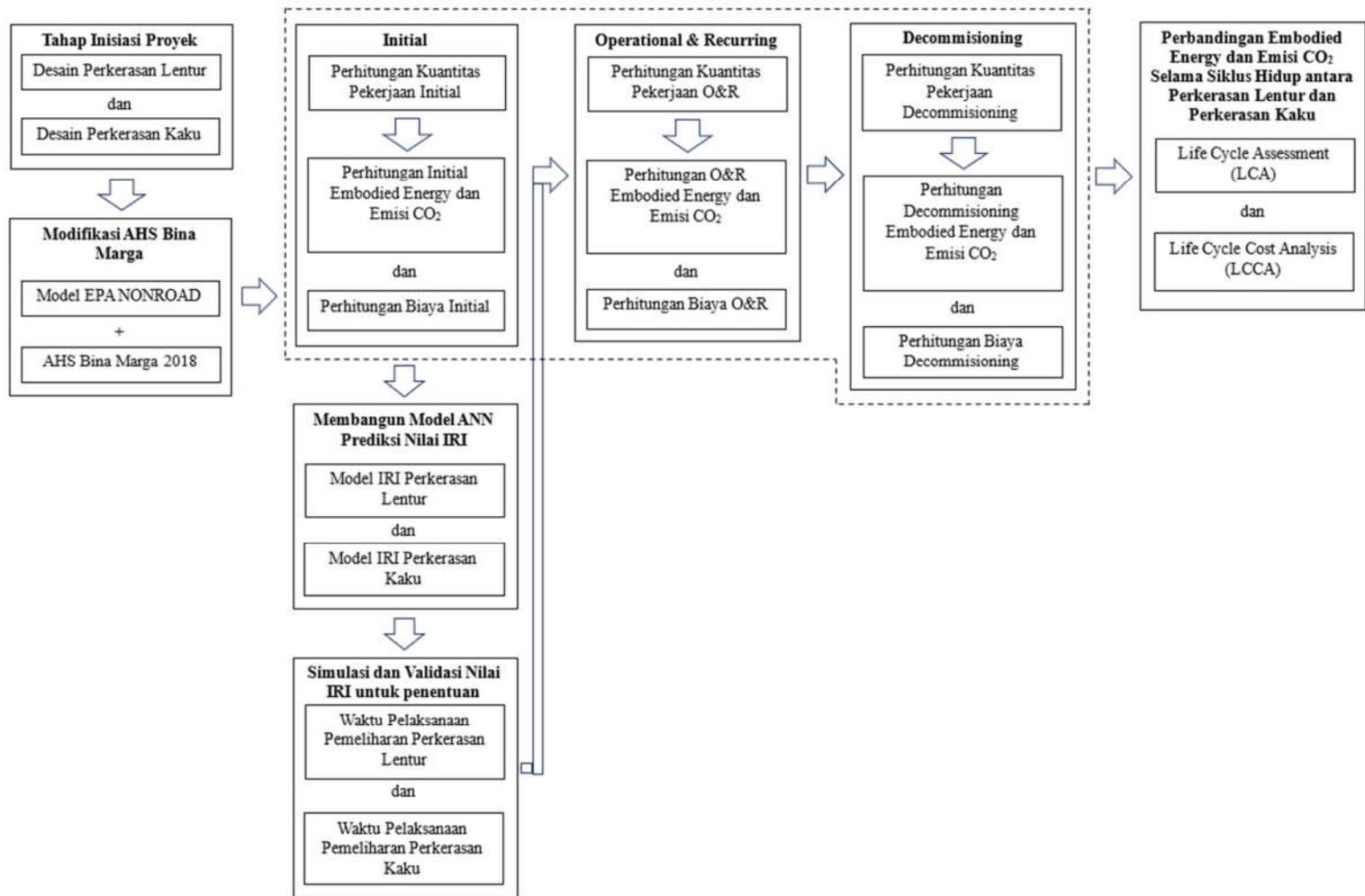


**Gambar 2. 12 Diagram Skematis Struktur ANN**  
(Raju et al., 2011)

ANN adalah alat kecerdasan komputasi yang mampu bekerja mirip dengan sistem saraf biologis, terdiri dari tiga komponen utama: (1) neuron input, juga disebut sebagai elemen pemrosesan, yang misalnya mengacu pada data iklim lalu lintas dan input parameter lainnya, (2) bobot penghubung yang menghubungkan input ke output, dan (3) output neuron yang merujuk pada IRI. ANN terdiri dari lapisan tunggal ke banyak tergantung pada kompleksitas data dan arsitektur jaringan. Arsitektur multi-lapisan dapat berisi lebih dari satu lapisan tengah, juga disebut lapisan tersembunyi. Lapisan tersembunyi ini digunakan untuk memperbaiki pelatihan dengan menyesuaikan bobot penghubung untuk pelatihan untuk menghasilkan model terbaik (Bayrak et al., 2004). Setiap lapisan berisi satu set neuron. Semua neuron terhubung satu sama lain melalui sinapsis. Sinapsis ini (koneksi) memiliki bobot awal yang berubah selama proses berulang dari seluruh jaringan. Solusi khas dari hampir semua jaringan saraf dimulai dengan proses pelatihan. Kemudian, tahap validasi silang dan pengujian berlangsung di mana output yang diprediksi dibandingkan dengan output yang sebenarnya. Karena ANN menangani data yang tidak mengikuti hubungan matematika biasa, solusi akhir dianggap sebagai kotak hitam (Gurney, 1997). Mekanisme lengkap terutama tergantung pada pola koneksi antara neuron, metode penentuan berat koneksi, juga dikenal sebagai algoritma pembelajaran dan fungsi aktivasi neuron, juga disebut fungsi transfer (Yang et al., 2003). Ada perbedaan dalam memahami arsitektur karena studi yang berbeda menunjukkan hasil yang berbeda. Karena alasan itu, pada penelitian ini, metode coba-coba (*trial and error*) akan digunakan untuk memutuskan model terbaik.

#### **2.14. Kerangka Berpikir**

Kerangka berpikir merupakan suatu bentuk model konseptual atau kerangka kerja penelitian untuk mendapatkan berapa besar konsumsi energi, emisi dan biaya pada tahap konstruksi, operasi dan pemeliharaan/rehabilitasi, hingga *end of life* yang dihitung dari tahap desain ketika jalan masih direncanakan, sehingga pada tahap inisiasi proyek selanjutnya sudah dapat diketahui alternatif perkerasan yang akan digunakan. Adapun kerangka konseptual tersebut dapat dilihat pada Gambar 2.14 berikut ini.



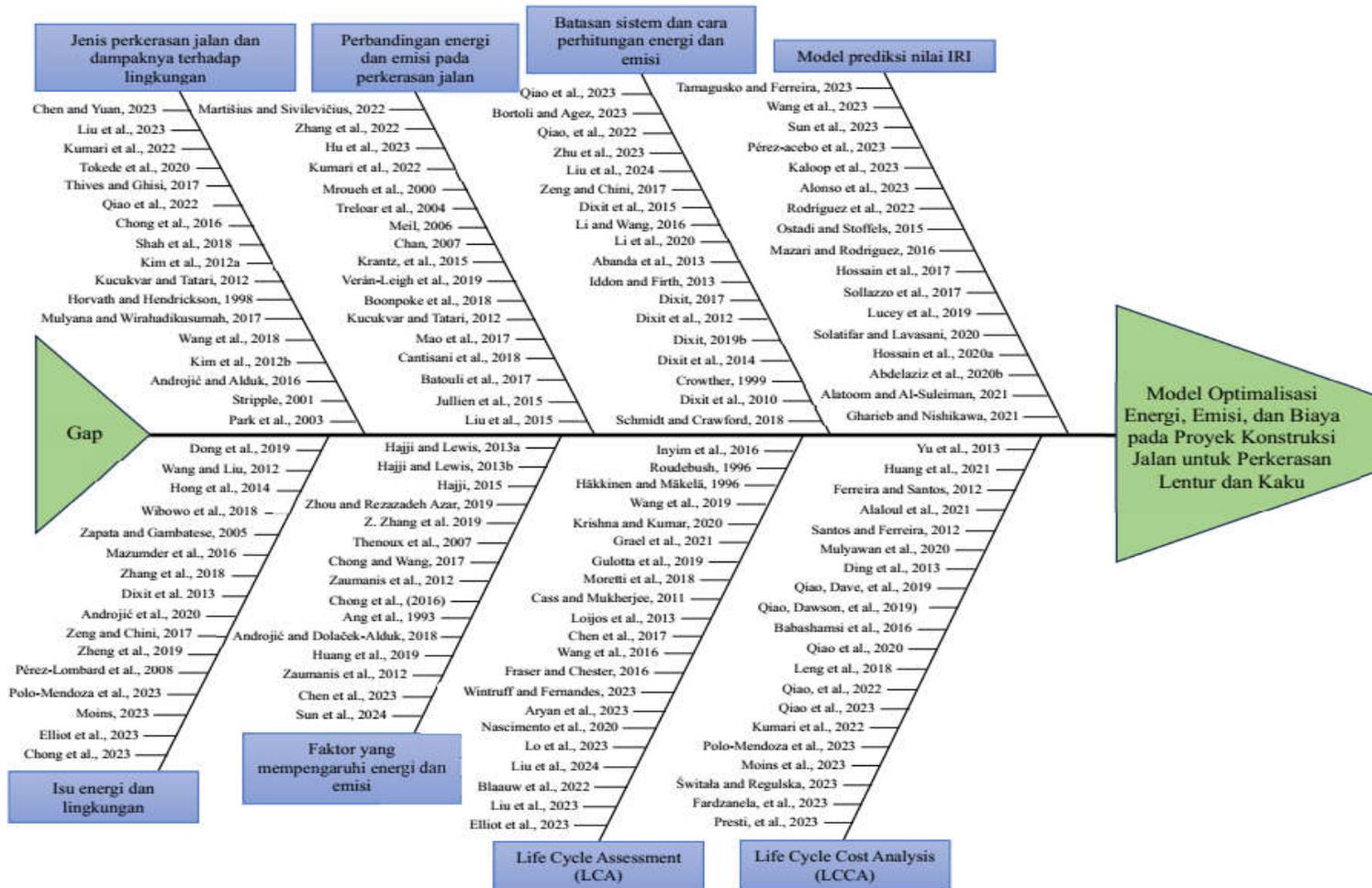
Gambar 2. 14 Kerangka Berpikir

### **2.15. Peta Jalan Penelitian (*Roadmap*)**

Proyek-proyek konstruksi jalan memiliki dampak signifikan pada lingkungan dan perekonomian, dengan mengikuti roadmap ini, peneliti dapat mengembangkan model untuk mengoptimalkan energi, emisi, dan biaya pada proyek konstruksi jalan untuk perkerasan lentur dan kaku, yang dapat membantu mengurangi dampak lingkungan dan biaya proyek konstruksi jalan. Langkah pertama peneliti dalam *roadmap* penelitian ini adalah melakukan studi literatur mendalam tentang konstruksi jalan, perkerasan lentur, perkerasan kaku, energi, emisi, dan biaya terkait dengan proyek-proyek konstruksi jalan. *Roadmap* penelitian ini akan menguraikan langkah-langkah utama yang akan diambil dalam pengembangan model ini. Dari kesenjangan (*gap*) yang diperoleh dari beberapa studi literatur yaitu sebagai berikut:

- Jenis perkerasan jalan dan dampaknya terhadap lingkungan (Chen and Yuan, 2023; Liu et al., 2023; Tokede et al., 2020; Thives and Ghisi, 2017, dst)
- Isu energi dan lingkungan (Polo-Mendoza et al., 2023; Moins et al., 2023; Elliot et al., 2023; Chong et al., 2023, dst)
- Perbandingan energi dan emisi pada perkerasan jalan (Hu et al., 2023; Martišius and Sivilevičius, 2022; Zhang et al., 2022; Kumari et al., 2022, dst)
- Faktor yang mempengaruhi energi dan emisi (Androjić et al., 2020; Huang et al., 2019; Mao et al., 2023; Sun, et al., 2024, dst)
- Batasan sistem dan cara perhitungan energi dan emisi (Liu, et al., 2024; Bortoli and Agez, 2023; Qiao et al., 2023; Zhu et al., 2023, dst)
- *Life Cycle Assessment* (LCA) (Liu, et al., 2024; Blaauw et al., 2022; Lo et al., 2023; Aryan et al., 2023, dst)
- *Life Cycle Cost Analysis* (LCCA) (Suwanto et al., 2023; Świtała and Regulska, 2023; Moins et al., 2023; Salah et al., 2021, dst), dan
- Model prediksi nilai IRI (Tamagusko and Ferreira, 2023; Wang, et al., 2023; Sun et al., 2023; Pérez-Acebo et al., 2023a dst).

Yang selanjutnya dikembangkan menjadi Model Optimalisasi Energi, Emisi, dan Biaya pada Proyek Konstruksi Jalan untuk Perkerasan Lentur dan Kaku, seperti dapat dilihat pada Gambar 2.15 berikut ini.



Gambar 2. 15 Peta Jalan Penelitian