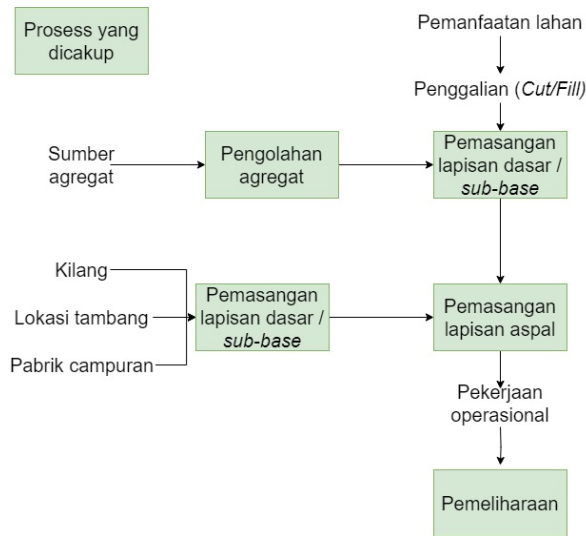


4. ANALISIS DATA DAN PEMBAHASAN

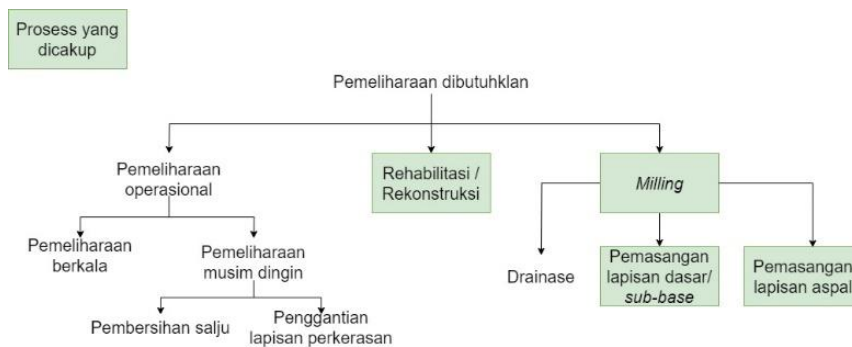
Industri Konstruksi merupakan kegiatan yang memiliki dampak besar terhadap lingkungan, yang ditandai dengan konsumsi energi dan karbon emisi yang dihasilkan (But, A. A., 2014). Hampir pada setiap tahapan konstruksi menghasilkan limbah, sebagai contoh perkerasan jalan yang telah memasuki akhir usia pemakaian yang harus dilakukan pembongkaran dan diperbarui, tentunya ini akan menghasilkan limbah bagi lingkungan. Meskipun dengan berbagai dampak yang buruk bagi lingkungan kegiatan konstruksi ini harus tetap berlangsung sebagai penunjang berbagai sektor lainnya. Untuk itu banyak peneliti yang berupaya dalam meningkatkan efisiensi dari konstruksi perkerasan jalan, berbagai upaya yang diambil seperti penggunaan kembali limbah padatan industri dan berbagai teknologi yang berupaya meningkatkan durabilitas dan kekuatan dari perkerasan jalan tersebut.

Pembahasan ini sebagai dasar acuan berupa perkerasan aspal konvensional yang menggunakan setidaknya 92 - 96% agregat alam (Pavement Interactive, 2022). Umumnya perkerasan aspal terbagi menjadi beberapa tahapan proses *life cycle assessment* (LCA) yang biasa digunakan. Proses LCA pada **Gambar 4.1** merupakan tahapan awal dari kerangka LCA yang akan dikembangkan pada pengolahan agregat dan aspal, pengangkutan material, pemadatan fondasi jalan, pemadatan lapisan aspal, dan operasional perkerasan jalan. Dan pada **Gambar 4.2** berupa tahapan perawatan dari perkerasan jalan, pada tahapan ini terdapat proses penggilingan ulang pada berbagai lapisan perkerasan jalan, pengaspalan ulang, dan pemadatan ulang. Berikut berupa tahap akhir dari masa pemakaian perkerasan jalan berupa penentuan umum akhir dari perkerasan aspal sebagai dasar mendukung konstruksi jalan hijau. Dari keputusan ini menjadi pertimbangan untuk perkerasan jalan tersebut akan di daur ulang menjadi perkerasan baru ataupun sudah tidak layak lagi dalam digunakan dalam perkerasan jalan melalui pengujian material (But, A. A., 2014).



Gambar 4. 1 Diagram Alir Proses Pembangunan Jalan Tahap Konstruksi

Sumber : But, A. A. (2014). Life Cycle Assessment of Asphalt Roads: Decision Support at the Project Level



Gambar 4. 2 Diagram Alir Proses Pembangunan Jalan Tahap Pemeliharaan dan Umur Akhir

Sumber : But, A. A. (2014). Life Cycle Assessment of Asphalt Roads: Decision Support at the Project Level

4.1 Material Limbah Industri Pada Perkerasan Jalan

4.1.1 Limbah Tailing

Industri pertambangan memiliki permasalahan dalam hal pengolahan limbah tailing yang berpotensi menyebabkan polusi dan permasalahan lingkungan. Unsur dalam limbah tailing sering dijumpai mengandung zat yang dapat meningkatkan pengasaman tanah dan kandungan logam berat. Setidaknya limbah tailing mengandung merkuri (Hg) dan Timbal (Pb) yang bersifat toksik akut, maka pihak kontraktor jalan perlu mengantisipasi dampak dari potensi pencemaran lingkungan tersebut (Anisa. P. T., et al., 2021). Hingga saat ini pengelolaan limbah belum

maksimal dikarenakan faktor biaya yang cukup besar. Untuk itu upaya saat ini dimanfaatkan dengan dikeringkan untuk menjadi agregat perkerasan jalan, pembendungan kolam tailing, dan potensi pemanfaatan lainnya kedepan (Segui et al., 2023).

4.1.1.1 Persentase Penggunaan Limbah Tailing

Berikut data sebagai acuan studi literatur yang berkaitan dengan penggunaan limbah tailing pada perkerasan jalan kaku dan perkerasan jalan lentur. Pada bagian ini juga memaparkan mengenai aplikasi limbah industri tersebut pada perkerasan jalan parameter pengujian yang dilakukan masing-masing peneliti yang terlampir pada **Tabel 4.1** dan **Tabel 4.2**.

Tabel 4. 1 Persentase Penggunaan Limbah Tailing Pada Perkerasan Kaku

Peneliti	Persentase Limbah Tailing	Parameter Uji
(Irianto et al., 2023)	Kadar Campuran Tailing 5%, 10%, dan 15	<ul style="list-style-type: none"> • Kadar penggunaan tailing 5% menghasilkan nilai tekan 21,73 kg/cm² • Kadar penggunaan tailing 10% menghasilkan nilai tekan 24,75 kg/cm² • Kadar penggunaan tailing 15% menghasilkan nilai tekan 26,19 kg/cm²

Tabel 4. 2 Persentase Penggunaan Limbah Tailing Pada Perkerasan Lentur

Peneliti	Persentase Limbah Tailing	Parameter Uji
(Setiawan & Pradani, 2013)	Maksimum penggunaan 30% Tailing	<ul style="list-style-type: none"> • Hasil Pengujian dengan Agregat Impact Value (AIV) dan Aggregate Cruising Value (ACV). • Penggunaan dibatasi 30% dari total berat campuran • Syarat berat jenis dari tailing 2,5%

Peneliti	Persentase Limbah Tailing	Parameter Uji
		<ul style="list-style-type: none"> • Penyerapan maksimum limbah tailing 3%
(Neni & Ringkasan, 2020)	Campuran tailing 45% dan 60%	<ul style="list-style-type: none"> • Dapat menggantikan agregat alam seukuran pasir • Penggunaan 60% pada lapis permukaan dapat menurunkan nilai stabilitas • Batas penggunaan yang direkomendasikan 45% dari total berat campuran
(Susanto et al., 2021)	Campuran tailing 0% - 100%	<ul style="list-style-type: none"> • Pengujian dengan marshall test • Diaplikasikan pada bagian sub base course • Presentase optimum adalah 60% tailing dengan 7% aspal alam

4.1.1.2 Regulasi Penggunaan Limbah Tailing

Karena tailing merupakan limbah beracun dan dalam kategori limbah B3 maka penggunaannya perlu diatur agar dampak positif dari penggunaan tailing tidak mencemari lingkungan. Untuk itu diatur dalam Peraturan pemerintah No 101 Tahun 2014, dalam permen LHK Nomor P.18 / MENLHK / SETJEN / KUM.1/ 8 /2020 yang berisikan tentang pemanfaatan limbah bahan berbahaya dan beracun (B3), pasal ini membahas secara spesifik mengenai penggunaan bahan baku limbah tailing pada pembangunan infrastruktur jalan dan jembatan. Dalam menangani dampak toksisitas dari limbah tailing ini maka PT Freeport Indonesia mencampurkan dengan agregat alam. Peraturan lainnya dari menteri PUPR berniat untuk memanfaatkan tailing sebagai bahan baku perkerasan yang tercantum pada keputusan menteri lingkungan hidup dan kehutanan Nomor: SK.129 / Menlhk / Setjen / PLB.3 / 3 / 2020 (Anisa Putri Triana et al., 2021).

4.1.1.3 *Life Cycle Assessment (LCA) Fase Konstruksi*

Limbah tailing pada penelitian ini digunakan tanpa proses pengolahan lebih lanjut, dan langsung diaplikasikan pada perkerasan jalan. Hasil dari penelitian terkait penggunaan limbah tailing ini dapat diaplikasikan untuk perkerasan kaku maupun perkerasan lentur. Limbah tailing yang akan digunakan pada material perkerasan jalan, diolah dengan cara dikeringkan dan di sortir berdasarkan ukuran. Untuk limbah tailing berukuran besar (1-16 mm) digunakan sebagai agregat kasar pengganti kerikil alam, untuk limbah tailing berukuran (1-4 mm) dapat digunakan sebagai pengganti agregat halus, dan untuk ukuran kurang dari 1 mm dapat digunakan sebagai filler (Segui et al., 2023). Dampak langsung pada perkerasan jalan dengan limbah tailing adalah dapat meningkatkan kekuatan selip. Pelaksanaan campuran aspal secara langsung limbah tailing berdasarkan pengujian laboratorium dengan uji stabilitas *marshall test*, modulus tarik, dan kelembaban dapat menggantikan maksimum 20% material alam. Limbah tailing juga dapat dicampurkan dengan pengikat atau aditif berupa *silane coupling agent* dan beberapa bahan kimia lainnya untuk mengurangi dampak dari penyerapan yang tinggi dari limbah tailing (Zhu et al., 2022). Hasil pengujian laboratorium ini telah memenuhi standar uji spesifikasi untuk diaplikasikan pada perkerasan jalan. Permasalahan yang sering muncul adalah tahapan transportasi dari limbah tailing ini, dikarenakan area pertambangan dengan konstruksi perkerasan jalan yang cukup jauh, sehingga menimbulkan dampak lingkungan emisi pada saat transportasi berlangsung. Untuk itu penggunaan limbah tailing direkomendasikan lebih untuk area perkerasan jalan yang berada di sekitar area pertambangan untuk memastikan dampak lingkungan dari konstruksi jalan hijau.

4.1.1.4 *Life Cycle Assessment (LCA) Fase Operasional*

Lokasi yang telah menggunakan perkerasan jalan dengan campuran limbah tailing pada proses pembangunannya adalah jalan "*Million Dollars Highway*" di Colorado Amerika Serikat. Pada proyek ini menggunakan kurang lebih 90 ribu ton limbah tailing, yang terbagi untuk agregat kasar berukuran (4-16 mm) yang digunakan pengganti sebagian agregat di *subbase* untuk timbunan ulang, juga limbah tailing berukuran medium (1-4 mm) digunakan sebagai pengganti pasir pada bagian base course hingga permukaan. Melalui pengujian di lapangan secara langsung ini, perkerasan dengan campuran tailing ini memiliki potensi yang baik sebagai pengganti agregat alam (Segui et al., 2023).

4.1.1.5 *Life Cycle Assessment (LCA) Fase Pemeliharaan*

Limbah tailing yang memiliki kadar air cukup tinggi menyebabkan daya rekat terhadap aspal yang buruk jika digunakan sebagai pengganti agregat. Tentu hal ini akan menyebabkan

penurunan kinerja perkerasan beton aspal, yang berdampak pada pemeliharaan perkerasan jalan. Untuk meningkatkan nilai pengikat dari limbah tailing digunakan beberapa campuran seperti *silane coupling agent*, reaksi dari pengikat dengan limbah tailing yang menghasilkan reaksi kimia yang dapat meningkatkan nilai penyerapan aspal. Hasil penelitian menunjukkan dengan penambahan aditif tersebut sebanyak 0,6% dari berat total benda uji dapat meningkatkan daya rekat limbah tailing ke aspal hingga 16,5%, sehingga dampaknya struktur jaringan menjadi lebih stabil, peningkatan kualitas, kemampuan menahan deformasi, meningkatkan kekuatan tarik lentur, dan meningkatkan terhadap ketahanan suhu (Zhu et al., 2022)

4.1.1.6 Life Cycle Assessment (LCA) Fase Umur Akhir Perkerasan

Pada saat ini limbah tailing banyak digunakan sebagai material perkerasan jalan dasar dengan lalu lintas rendah. Penggunaannya sebagai agregat kasar hingga agregat halus pada campuran perkerasan jalan, meskipun demikian studi penggunaan limbah tailing pada lapis perkerasan jalan telah memenuhi persyaratan sebagai indikator umum perkerasan jalan. Namun perlu dilakukan pemisahan untuk limbah tailing yang berukuran sangat halus, karena limbah tailing yang berukuran halus akan berdampak negatif pada kekuatan perkerasan jalan. Dampak positif dari limbah tailing sendiri sampai akhir umur rencananya memiliki stabilitas kinerja perkerasan suhu tinggi sampai batas tertentu yang lebih baik dibandingkan dengan perkerasan aspal beton konvensional, tetapi dari sisi ketahanan retak suhu rendah dan stabilitas terhadap air mengalami penurunan, karena terkait dari sifat dari limbah tailing itu sendiri yang berinteraksi dengan aspal. Untuk meningkatkan daya rekat dari aspal dengan campuran limbah tailing dibutuhkan tambahan bahan kimia sebagai modifikasi campuran tersebut, sehingga dapat meningkatkan kinerja perkerasan campuran aspal dengan limbah tailing, khususnya dari stabilitas air (Segui et al., 2023).

4.1.2 Limbah Steel Slag

Beberapa penelitian mengungkapkan kemiripan antara limbah *steel slag* dengan agregat konvensional yang biasa digunakan pada campuran perkerasan jalan. Hal ini tentunya akan memberikan keuntungan dalam pengolahan kembali limbah *steel slag* dan penghematan sumber daya mineral alam. Selain itu agregat dari *steel slag* lebih hemat energi jika dibandingkan dengan agregat alami yang diambil dari sungai maupun proses penambangan, sehingga berdampak signifikan pada lingkungan. Namun sifat dari *steel slag* yang berpori dan berbentuk tidak beraturan memerlukan kadar campuran aspal yang lebih tinggi. Selain itu juga kandungan

MgO dan CaO pada permukaan *steel slag* menyebabkan keretakan dan memperparah kerusakan akibat terpapar oleh kelembaban dari bagian antara aspal dengan agregat (Panda et al., 2022). Oleh karena karakter fisik dari *steel slag* harus dilakukan penelitian lebih lanjut terhadap mendapatkan kadar campuran optimal dari *steel slag* dan aspal tersebut. Mengacu pada LCA, maka hal emisi gas rumah kaca dan dampak lingkungan menjadi penting untuk dibahas, adapun dampak signifikan berupa resiko pencemaran akibat logam berat dari proses penggunaan limbah *steel slag* pada lapisan perkerasan jalan selama masa layanan perkerasan aspal tersebut. Untuk itu agregat dari limbah *steel slag* harus didiamkan selama minimal 6 bulan untuk dapat digunakan kembali pada perkerasan jalan (Liu et al., 2023).

4.1.2.1 Persentase Penggunaan Limbah *Steel Slag*

Pada bagian ini akan dibahas mengenai beberapa penelitian terkait persentase penggunaan dan dampak pemanfaatan limbah *steel slag* dari beberapa peneliti yang mengacu terhadap konstruksi jalan hijau, selain itu juga membahas karakteristik dari aspal limbah steel slag pada **Tabel 4.3**.

Tabel 4. 3 Persentase Penggunaan *Steel Slag* Pada Perkerasan Lentur

Peneliti	Persentase Limbah <i>Steel Slag</i>	Parameter Uji
(Liu et al., 2023)	Steel Slag 0%, 50%, dan 100%	<ul style="list-style-type: none"> • Karakteristik <i>steel slag</i> yang porus meningkatkan kebutuhan aspal • Kadar 50% mengurangi dampak dari kelembaban • Penambahan <i>steel slag</i> meningkatkan kekompakan antar struktur
(Li et al., 2022)	Campuran <i>Steel Slag</i> 10%-21%	<ul style="list-style-type: none"> • Diperlukan pemadatan yang tinggi untuk dapat bekerja optimal • Dibutuhkan pengujian terhadap campuran aspal optimal pada tahapan <i>mix</i>

Peneliti	Persentase Limbah <i>Steel Slag</i>	Parameter Uji
		<i>desain</i> agar berdampak baik pada lingkungan
(Panda et al., 2022)	Campuran <i>Steel Slag</i> 0%-100%	<ul style="list-style-type: none"> • Pengujian hingga 100% <i>steel slag</i> belum ditemukan zat yang dapat mencemari lingkungan dan berbahaya bagi manusia
(Rahmawati et al., 2017)	<i>Steel Slag</i> sebanyak 0%, 25%, 50%, 75%, dan 100%	<ul style="list-style-type: none"> • Peningkatan kadar <i>steel slag</i> maka nilai VMA akan meningkat karena sifat porus dari <i>steel slag</i> • Direkomendasikan penggunaan maksimum 50% dari berat total campuran agregat
(Aziz et al., 2014)	<i>Steel Slag</i> sebanyak 30%-70%	<ul style="list-style-type: none"> • Aplikasi pada <i>Surface course</i> dapat memberikan ketahanan pada uji selip • Mencegah kerusakan dini karena karakteristik pengunci aspal yang baik

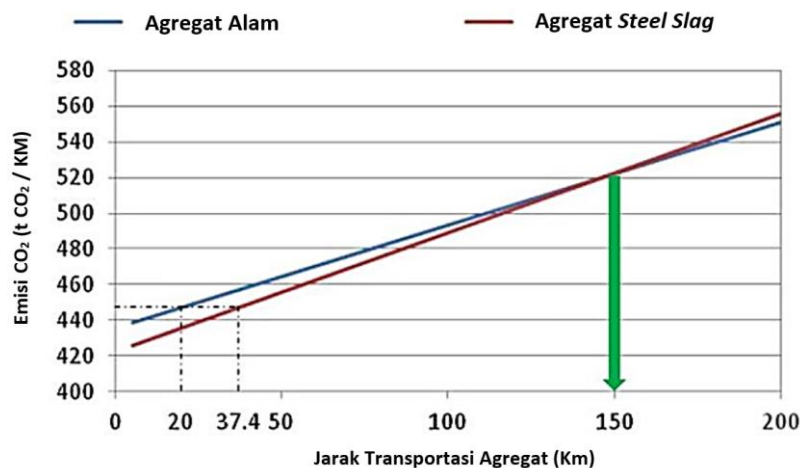
4.1.2.2 Regulasi Penggunaan Limbah *Steel Slag*

Regulasi yang berkaitan dengan penggunaan limbah *steel slag* yang terdapat pada *Australasian Slag Association (ASA)* yang berjudul *a guide to the use of iron and steel slag in roads*. Dijelaskan bahwa penggunaan limbah *steel slag* pada perkerasan jalan hanya untuk bagian *subbase* dan *base course*, dengan penggunaan maksimum 20% dari total berat agregat yang akan dilakukan penggantian. Selain itu juga terdapat regulasi berkaitan dengan distribusi gradasi dari ukuran limbah *steel slag*, campuran *asphalt mix design* yang memenuhi standar tekan minimum, proses pelaksanaan konstruksi dan pemeliharaan pada perkerasan jalan dengan limbah *steel slag*. Sumber lainnya yang berasal dari Amerika Serikat juga mengungkapkan penggunaan kadar limbah *steel slag* yang lebih tinggi berkisar 49,7% yang dapat

digunakan secara langsung. Mengacu pada hasil pengujian yang menunjukkan bahwa limbah *steel slag* ditemukan memiliki ketahanan selip yang unggul dibandingkan dengan agregat alam, memiliki ketahanan yang besar terhadap kelembaban. Penggunaan limbah ini berfokus sebagai pengganti agregat kasar dalam konstruksi jalan, faktor-faktor ini yang menyebabkan persentase penggunaan limbah *steel slag* yang berbeda-beda sebagai acuan dalam pelaksanaan konstruksi jalan (Aquib et al., 2023).

4.1.2.3 Life Cycle Assessment (LCA) Fase Konstruksi

Fase konstruksi perkerasan aspal dengan limbah *steel slag* melibatkan beberapa langkah. Pertama, limbah *steel slag* harus dipersiapkan secara tepat sebelum digunakan dalam campuran agregat perkerasan. Sebelum itu *steel slag* dapat diaplikasi untuk perkerasan aspal maupun perkerasan beton sebagai pengganti agregat alam, untuk tahapan campuran perkerasan sendiri dapat dilakukan dengan beberapa langkah, limbah *steel slag* dikumpulkan sebagai alternatif pengganti agregat kasar dalam campuran aspal, meminimalkan penggunaan bahan tambahan dan memanfaatkan limbah industri, Hal Ini mengurangi dampak lingkungan dan melakukan daur ulang. Namun berdasarkan hasil penelitian diketahui pada pengumpulan *steel slag* akan memerlukan proses transportasi, jika jarak transportasi melebihi 150 km maka index dari gas emisi CO₂ yang dihasilkan akan setara dengan agregat alam pada **Gambar 4.3**. Untuk itu diperlukan perhatian khusus untuk menentukan jarak transportasi dengan lokasi produksi perkerasan jalan yang ada. Berikutnya limbah *steel slag* diproses dan dipersiapkan untuk dicampur dengan campuran perkerasan aspal, proses ini melibatkan pengaturan proporsi yang tepat dan penyesuaian untuk memastikan sifat campuran yang sesuai dengan standar teknis perkerasan jalan. Setelah persiapan bahan, campuran aspal dengan limbah *steel slag* diproduksi sesuai dengan desain rencana yang ditetapkan. Proses ini penting dikarenakan pencampuran bahan-bahan dengan proporsi yang tepat akan berguna untuk mencapai karakteristik fisik dan mekanis yang diinginkan. Setelah konstruksi selesai, perkerasan dengan limbah *steel slag* dievaluasi secara berkala untuk memastikan kinerja yang optimal. Pemeliharaan rutin dilakukan untuk memperpanjang umur layanan dan mengoptimalkan keberlanjutan lingkungan (Li et al., 2019).



Gambar 4. 3 Perbandingan Transportasi Agregat *Steel Slag* dengan Agregat Alam

Sumber : Li, J., Xiao, F., Zhang, L., & Amir Khanian, S. N. (2019). Life cycle assessment and life cycle cost analysis of recycled solid waste materials in highway pavement: A review

4.1.2.4 Life Cycle Assessment (LCA) Fase Operasional

Limbah steel slag menunjukkan hasil yang sangat baik sebagai agregat pengganti pada perkerasan jalan. Didukung dengan hasil penelitian yang menunjukkan agregat dari *steel slag* memiliki ketahanan terhadap abrasi dan selip yang lebih baik dibandingkan perkerasan jalan dengan agregat konvensional. Tentu saja penggunaannya akan berdampak terhadap lingkungan dengan pemanfaatan agregat dari bahan limbah dan juga emisi gas dari proses penambangan agregat alam. Pada masa konstruksi direncanakan untuk perkerasan jalan aspal dengan tebal rencana 290 mm dan 40 mm lapisan anti selip, lebih tebal dibandingkan perkerasan konvensional sekitar 40 mm, hal ini didasarkan dari penelitian sebelumnya dan hasil pengujian pada agregat *steel slag* membutuhkan ketebalan yang lebih dibandingkan perkerasan konvensional untuk mendapatkan hasil yang setara. Berdasarkan hasil penelitian dengan umur rencana 30 tahun, dievaluasi bahwa desain perkerasan jalan dengan campuran *steel slag* pada perkerasan aspal maupun perkerasan beton menunjukkan angka ekonomi yang lebih hemat dibandingkan dengan metode konvensional, dan dari sisi dampak lingkungan juga mengalami peningkatan dengan pemanfaatan limbah. Namun kembali perlu diperhatikan mengenai dosis campuran yang tepat agar dapat menyeimbangkan dampak dari *toksitas* limbah *steel slag* dengan manfaat yang lingkungan maupun ekonomi yang ada (Anastasiou et al., 2015).

4.1.2.5 Life Cycle Assessment (LCA) Fase Pemeliharaan

Karakteristik lainnya pada limbah *steel slag* adalah menyerap gelombang mikro, dibandingkan dengan agregat alam maka ini menjadi poin positif yang berdampak terhadap

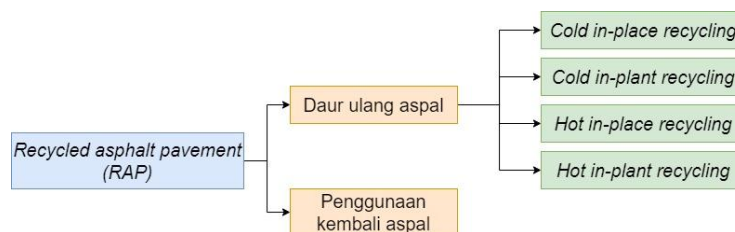
ketahanan dari perkerasan jalan, sehingga akan memperpanjang waktu pemeliharaan. Hal ini berguna khususnya di iklim sub tropis dengan suhu dingin, dengan adanya gelombang ini akan memperlambat terbentuknya salju, dan mempermudah pemecahan salju sehingga dapat segera memulihkan perkerasan jalan. Penelitian ini juga mengamati dengan penyerapan gelombang mikro pada campuran perkerasan panas dapat meningkatkan penyembuhan retak pada perkerasan jalan. dampak dari penggunaannya berupa proses pemeliharaan yang lebih sedikit, penggunaan energi yang lebih rendah dan mendorong pengurangan emisi CO₂ (Li et al., 2019).

4.1.2.6 Life Cycle Assessment (LCA) Fase Umur Akhir Rencana

Pada penelitian terkait penggunaan limbah *steel slag* pada perkerasan jalan di desain untuk umur akhir rencana selama 40 tahun, penggunaan perkerasan masih menggunakan sebagian agregat alam dan pengikat berupa semen dan aspal. Selain bahan tersebut juga digunakan bahan mineral alam lainnya untuk meminimalkan dampak dari karakteristik *steel slag* berupa batu kapur yang digunakan sebagai campuran agregat pada aspal dan campuran semen, pozzolan alam dan juga gypsum. Hasilnya menunjukkan bahwa dengan agregat *steel slag* dengan konsumsi bahan material alam yang minimum hanya berkisar (14,5%, 16,4%, dan 17,2%). Penggunaan alternatif dari agregat *steel slag* ini mempunyai pengaruh terhadap penurunan kadar CO₂, bahkan untuk dengan jarak transportasi yang cukup jauh, nampak masih memiliki tingkat gas karbon yang dilepaskan lebih rendah daripada penggunaan agregat alam. Namun tetap disarankan untuk mencapai potensi terbaik dari agregat *steel slag* jarak pengangkutan dan penggunaan *steel slag* hanya untuk jarak yang pendek (Anastasiou et al., 2015).

4.1.3 Limbah Reclaimed Asphalt Pavement (RAP)

Metode yang paling sering digunakan dalam pengolahan RAP dengan melakukan penggilingan perkerasan jalan lama atau dikenal sebagai metode *cold planing*, dan metode yang kedua dengan pembongkaran perkerasan jalan secara menyeluruh. RAP dapat digunakan pada lapisan perkerasan aspal dalam berbagai campuran pada **Gambar 4.4**. Proses daur ulang aspal dengan cara menambahkan beberapa persen kadar RAP ke dalam campuran aspal baru, dengan tujuan mendapatkan kinerja yang sama seperti penggunaan aspal aslinya, proses pencampuran ini dapat dilakukan untuk menggantikan jenis agregat alam, bahan pengisi (*filler*), dan dapat juga dimanfaatkan sebagai bahan pengikat (*bitumen*)(Li et al., 2019).



Gambar 4. 4 Pengaplikasian Limbah RAP Metode Panas Dan Dingin

Sumber : Li, J., Xiao, F., Zhang, L., & Amir Khanian, S. N. (2019). Life cycle assessment and life cycle cost analysis of recycled solid waste materials in highway pavement: A review. In *Journal of Cleaner Production* (Vol. 233, pp. 1182–1206)

Secara umum penggunaan kembali aspal dan pemanfaatan RAP sebagai agregat dapat digunakan pada hampir seluruh bagian dari lapisan aspal, tidak terikat hanya pada *subbase* dan *base course* saja. Penggunaan RAP pada penerapan aslinya menunjukkan penurunan jika dibandingkan dengan aspal aslinya, oleh karena itu penggunaan RAP dapat diartikan sebagai siklus *downcycling*, yang menandakan sebagai proses daur ulang limbah padat menjadi produk baru namun secara fungsi dan kualitas mengalami penurunan. Namun dibalik kekurangan tersebut, RAP masih dapat dikategorikan sebagai proses yang murah dan ramah lingkungan dibandingkan dengan aspal murni, karena meskipun dipandang sebagai bahan limbah, RAP tetap dapat menghasilkan efisiensi struktural yang sebanding (Abdalla et al., 2022).

4.1.3.1 Persentase Penggunaan Limbah *Reclaimed Asphalt Pavement* (RAP)

Data dari National Asphalt Pavement Association limbah pembongkaran aspal secara general mengalami kenaikan 8,74% dari tahun sebelumnya. Diantara RAP tersebut sebanyak 95% diperbarui menjadi perkerasan baru, ini menunjukkan potensi dari penggunaan aspal daur ulang dan komitmen dalam mengadopsi keberlanjutan lingkungan, yang dapat terlihat pada penghematan 2,6 juta Metrik Ton CO₂. Untuk itu berikut pengaruh penggunaan RAP berdasarkan persentase penggunaan, pengujian RAP, dan kadar optimal penggunaan RAP berdasarkan hasil pengujian pada **Tabel 4.4**.

Tabel 4. 4 Persentase Penggunaan *Reclaimed Asphalt Pavement* (RAP) Pada Perkerasan Lentur

Peneliti	Persentase Limbah RAP	Parameter Uji
Gottumukkala et al., 2021	Campuran RAP 10%, 20%, 30%, 40%, dan 50%	<ul style="list-style-type: none"> Kenaikan persentase RAP maka meningkat juga

Peneliti	Persentase Limbah RAP	Parameter Uji
		ketahanan terhadap alur dan mengurangi kelelahan
Pradyumna et al., 2021	Campuran RAP 10%, 15%, dan 20%	<ul style="list-style-type: none"> • Kadar campuran optimal 20% • Terjadi peningkatan volumetrik, sifat mekanik, dan kinerja optimal perkerasan aspal
Abo-Qudais et al., 2021	Campuran RAP 0%, 5%, 10%, 15%	<ul style="list-style-type: none"> • Kadar 15% RAP meningkatkan ketahanan alur yang lebih baik
Caitanya et al., 2015	Campuran RAP 0%, 15%, 25%, 35%, dan 50%	<ul style="list-style-type: none"> • Kadar 35% RAP meningkatkan ketahanan lelah • Namun terjadi peningkatan kekakuan perkerasan aspal
El-Hmrawet et al., 2015	Penggunaan RAP dengan persentase (25%,50%,75%,100%)	<ul style="list-style-type: none"> • Aplikasi Pada Hotmix asphalt • Setiap kenaikan persentase RAP maka uji marshall test mengalami penurunan. • 25% merupakan kadar optimum
Sunil et al., 2014	Penggunaan RAP 60%, 70%, dan 80%	<ul style="list-style-type: none"> • Pengujian 80% RAP mengalami penurunan kekuatan perkerasan • Pada pengujian 60% mengalami penurunan hasil pengujian, dalam batas toleransi syarat perkerasan aspal

Peneliti	Persentase Limbah RAP	Parameter Uji
Boriack et al., 2013	Campuran RAP 0%, 20%, 40%, 100%	<ul style="list-style-type: none"> • Persentase RAP lebih tinggi meningkatkan kekakuan • Mengurangi Deformasi Permanen
TabakoviC et al., 2010	Penggunaan 30% RAP	<ul style="list-style-type: none"> • Kadar 30% RAP merupakan optimal dalam pengujian ketahanan lelah dan sifat mekanik perkerasan aspal

4.1.3.2 Regulasi Penggunaan Limbah *Reclaimed Asphalt Pavement* (RAP)

Regulasi penggunaan RAP ini pada daerah Amerika Serikat, dengan mempertimbangkan data penggunaan RAP pada tahun 2021 sebanyak 94,6 juta ton menurut *National Asphalt Pavement Association*. Rata-rata penggunaan dari limbah RAP ini digunakan kembali pada perkerasan lentur. Mengingat hasil pengujian laboratorium dan hasil pengamatan penggunaan RAP yang cenderung bervariasi terhadap persentase penggunaan RAP terhadap campuran aspal baru maka diperlukan kebijakan yang mengatur penggunaan RAP dari sudut pandang lembaga negara demi tercapainya keamanan berkendara. Hal ini muncul dari kekhawatiran mengenai variabilitas kadar RAP pada setiap kondisi yang berbeda-beda, kebijakan dan kemampuan pengelolaan RAP oleh pabrik, penyimpanan RAP hingga proses pemanfaatan RAP yang tidak selalu sama, selain itu juga ada permasalahan lain seperti kurangnya metode standar yang jelas terhadap persentase campuran, pencampuran aditif, penyesuaian dengan bahan pengikat. Hasil pengujian laboratorium yang tidak mencerminkan kinerja serupa dengan lapangan, dikarenakan faktor antara lain jenis campuran, kondisi iklim, teknik konstruksi, dan kemampuan pencampuran yang berbeda-beda pada setiap kontraktor, untuk itu lembaga negara menetapkan beberapa metode untuk penggunaan RAP dengan kandungan pada campuran perkerasan aspal baru melalui spesifikasi yang ditentukan pada setiap negara.

Regulasi penggunaan *reclaimed asphalt pavement* (RAP) difokuskan untuk negara-negara yang memiliki karakteristik perkerasan jalan yang hampir mirip dengan di Indonesia, faktor-faktor karakteristik berupa kondisi perkerasan jalan, iklim yang serupa, dan lokasi yang berada di area sekitar asia sehingga faktor alam yang cukup identik dengan di Indonesia. Regulasi ini berasal dari negara India, yang di atur pada *Indian Roads Congress* oleh regulasi yang tercantum pada *recommended practice for recycling of bituminous pavement*. Pada regulasi

tersebut dijelaskan secara detail mengenai tahapan pengolahan kembali perkerasan jalan, pengujian minimum untuk jenis material RAP dan juga jenis aplikasi perkerasan RAP.

Regulasi di Indonesia belum secara spesifik membatasi berapa persen penggunaan RAP untuk perkerasan jalan, namun peraturan terkait penggunaan RAP yang berkaitan dengan proses pelaksanaan, persentase campuran material alam, campuran pengikat, dan pelaksanaan yang diatur oleh peraturan Direktorat Bina Marga dalam spesifikasi khusus campuran beraspal panas daur ulang dan pencampuran unit produksi campuran aspal. Selain dari itu juga terdapat pada SNI 2010 (spesifikasi Umum 2010) yang membahas mengenai campuran agregat alam dengan material daur ulang (Direktorat Bina Marga, 2019 ; Ansori & Radam, 2015).

4.1.3.3 Life Cycle Assessment (LCA) Fase Konstruksi

RAP sendiri terdapat dua proses pengolahan yaitu proses daur ulang di tempat dingin dan proses daur ulang di tempat panas yang dilakukan di pabrik. kedua hal ini berpengaruh terhadap proses pengaplikasian dari RAP tersebut.

Cold in Place Recycling (CIPR)

Proses konstruksi daur ulang RAP dengan metode *Cold in Place Recycling (CIPR)* dengan cara menggunakan kembali RAP sebagai timbunan sehingga mengurangi penggunaan agregat alam. Selain itu penggunaan metode ini biasanya bersamaan dengan aspal emulsi karena tidak memerlukan pemanasan. Hal ini akan memberi keuntungan dari LCA produk RAP, untuk mengurangi dampak penurunan kualitas dapat ditambahkan semen maupun kapur meskipun dalam jumlah sedikit (Oreto et al., 2021). Proses ini mengurangi konsumsi energi hingga 16% jika dibandingkan dengan penggunaan aspal tradisional. Tahapan dalam proses *Cold in Place Recycling (CIPR)* melibatkan proses pencampuran dengan aspal baru pada lapisan atas untuk menjamin mutu dan kualitas dari perkerasan jalan tersebut (Li et al., 2019). Dikarenakan komponen dari *cold mix plant* yang relatif kompak, sehingga komponen tersebut dapat dipasang dekat dengan lokasi proyek. Material RAP, agregat baru, aspal emulsi atau bahan daur ulang emulsi dibawa dengan truk dump menuju lokasi proyek, kemudian dihamparkan dan dipadatkan dengan roller. Bahan tambah juga dapat ditambahkan seperti kapur, aspal baru, dan *fly ash* yang bertujuan untuk meningkatkan kekuatan awal campuran daur ulang dan ketahanan terhadap kelembaban (Abdalla et al., 2022 ; Milad et al., 2020).

Hot in Plant Recycling (HIPR)

Proses konstruksi daur ulang RAP dengan metode *Hot in Plant Recycling (HIPR)* yaitu menambahkan campuran RAP dengan aspal baru dengan campuran berkisar 0-40% RAP dari berat total keseluruhan. Hasil dapat menurunkan emisi gas rumah kaca hingga 40% seiring

dengan peningkatan kadar dari RAP tersebut (Li et al., 2019). Hasil juga menunjukkan dampak lingkungan yang terendah dalam siklus hidup perkerasan aspal dengan *hot mix* RAP jika dibandingkan dengan *hot mix* tradisional maupun *warm mix* dengan campuran aditif. Proses dalam pengolahan material RAP dengan penilaian material RAP dan desain campuran yang berguna untuk memastikan mutu dari perkerasan tersebut. RAP yang sudah dibongkar dilakukan pengangkutan ke pabrik untuk diproses lebih lanjut, RAP kemudian dihancurkan dan disaring berdasarkan ukuran agregat yang lolos saringan, kemudian RAP akan dicampurkan ke dalam campuran aspal panas. Jenis perkerasan ini memiliki keunggulan dalam waktu konstruksi yang lebih singkat sehingga menghilangkan penundaan lalu lintas yang ada, jika dibandingkan dengan perkerasan *cold mix* yang memerlukan waktu untuk proses pengeringan, dengan adanya ikatan pada proses pemanasan menyebabkan kemampuan ikatan yang lebih baik, dan proses pengaplikasiannya yang lebih bervariasi terhadap jenis agregat, jenis aspal, campuran bahan daur ulang dan juga rejuvenator campuran (Qiao et al., 2019 ; Pradyumna et al., 2013 ; Ishraq Hameed Naser, 2021).

4.1.3.4 Life Cycle Assessment (LCA) Fase Operasional

Beberapa indikator mengenai siklus hidup pada fase operasional perkerasan aspal RAP yang berdampak pada fungsionalitas, kualitas berkendara, dan terpenting menurunkan biaya dari proses pemeliharaan perkerasan aspal RAP. Meskipun pengujian sudah dilakukan secara intens di laboratorium namun tetap perlu dilakukan pengujian secara langsung terhadap perkerasan jalan yang ada. Faktor seperti perubahan iklim yang ada, pergerakan dan keadaan kendaraan yang terus meningkat di masa depan juga akan berpengaruh terhadap ketahanan perkerasan jalan yang ada. Maka perlu direncanakan lebih untuk kemungkinan-kemungkinan di masa yang akan datang mengenai beberapa faktor tersebut, sehingga dapat menentukan waktu terbaik untuk melakukan perawatan perkerasan dan akhir umur pakai dari perkerasan jalan tersebut. Studi kasus dilakukan di salah satu ruas jalan raya antar negara di pantai timur Amerika I-95, dengan panjang ruas jalan kira-kira 22 km dan 4 lajur dengan masing-masing lebar lajur 3,7 m. Dilakukan beberapa skenario mengenai prediksi iklim masa dengan berkaitan dengan curah hujan, perubahan suhu, arah angin, dan kelembaban, dengan membandingkan data iklim pada masa lalu dengan tren pergerakan iklim saat ini yang mengalami kenaikan suhu permukaan bumi antara 2-5 derajat celsius, curah hujan rata-rata di masa depan dengan perkiraan 213 mm lebih tinggi. Dengan volume lalu lintas kendaraan berat yang melintas jalan tersebut sebanyak 10%, namun pertumbuhan lalu lintas pada penelitian studi kasus ini diabaikan karena tidak ada data berkaitan dengan pertumbuhan lalu lintas yang ada.

Hasil Penelitian mengenai kinerja perkerasan pada kondisi iklim dengan campuran 40% RAP dengan pencampuran aspal panas. Perkerasan RAP 40% dibandingkan dengan aspal panas konvensional, didapatkan perlunya perawatan berupa *overlay* pada tahun keenam dikarenakan efek dari *rutting* dan index kekasaran permukaan (IRI), serta memperbaiki pada dampak keretakan termal dan *fatigue cracking* pada lapis perkerasan, dan pada tahun ke-15 dilakukan sekali lagi *overlay* untuk mengatur ulang kekuatan perkerasan aspal. Hal ini dampak dari penambahan 40% RAP meningkatkan kekakuan aspal sehingga lebih tahan terhadap *rutting* namun disisi lain mempercepat kerusakan akibat retak termal, IRI dan *fatigue cracking* juga mengalami penurunan seiring penggunaan perkerasan. Sehingga total biaya siklus hidup pada masa operasional perkerasan jalan dengan 40% RAP lebih rendah 2% dibandingkan dengan aspal konvensional, jika tidak menyertakan tahap pemeliharaan maka total biaya siklus dengan RAP 40% lebih rendah 18,3% dibandingkan dengan perkerasan konvensional (Qiao et al., 2019 ; Assaf & Abu Abdo, 2022).

4.1.3.5 Life Cycle Assessment (LCA) Fase Pemeliharaan

Proses pemeliharaan perkerasan jalan dengan campuran limbah RAP dilakukan dengan cara pembersihan area yang rusak dari kotoran dan material, bila terdapat kerusakan yang cukup parah maka dilakukan pemotongan bagian aspal yang rusak dan lakukan penggantian dengan campuran yang tercampur limbah RAP, adapun metode perbaikan lainnya dengan *overlay* lapis perkerasan yang ada sesuai dengan desain rencana dan kondisi perkerasan yang ada. Jika memerlukan lakukan *Rolling* pada area yang akan diperbaiki untuk memastikan *adhesi* yang baik antara aspal lama dan yang baru. hal ini dilakukan untuk memastikan kekokohan dan kualitasnya (Direktorat Bina Marga, 2021).

Batasan dalam menentukan keperluan pemeliharaan perkerasan jalan jika dianggap telah melebihi batas minimum perkerasan standar yang ada. Pemeliharaan dilakukan ketika indeks kekasaran permukaan (IRI) telah mencapai batas minimum 172 in/mi (2,7 m/km), untuk batas *rutting* minimum 19mm, *fatigue cracking* telah mencapai 25% dari kondisi normal, dan retak termal mencapai 1000 ft/mi (190 m/km) sesuai dengan ketentuan AASHTO 2009. Sebagai bentuk proses pemeliharaan kedepannya, diberikan ketebalan lapisan luar permukaan aspal setebal 2 inch (51mm) untuk mengatasi berbagai kondisi kerusakan pada perkerasan aspal tersebut (Qiao et al., 2019).

4.1.3.6 Life Cycle Assessment (LCA) Fase Umur Akhir Rencana

Secara umum penggunaan limbah RAP dapat efektif mengurangi beban lingkungan khususnya pada tahap produksi material. Namun material RAP perlu mendapatkan perhatian

terhadap ketahanan perkerasan yang akan berdampak pada umur pemakaian perkerasan jalan. Umumnya perkerasan jalan dengan RAP dan campuran rejuvenator akan mengalami penurunan ketahanan lebih cepat dibandingkan campuran aspal baru. Oleh karena itu perlu dilakukan upaya untuk dapat mempertahankan umur rencana pada masa hidup perkerasan jalan selama 20 tahun terhadap paparan beban pemeliharaan berlebih yang tentunya akan mengurangi bahkan menghilangkan manfaat dari campuran perkerasan jalan dengan campuran RAP. Perlu diperhatikan untuk melakukan prediksi mengenai kondisi lalu lintas yang akan dilalui, kondisi iklim, tingkat kepadatan jalan, tingkatan hambatan pada perkerasan jalan, dan emisi gas yang ditimbulkan, untuk itu diperoleh hasil penelitian upaya untuk merancang perkerasan jalan dengan RAP memiliki masa pakai yang sama dengan perkerasan aspal murni. Upaya dilakukan dengan penyesuaian tebal lapis perkerasan aspal, pemberian bagian lapisan atas perkerasan jalan dengan aspal murni akan memberikan kekuatan yang lebih pada perkerasan jalan, dan upaya penelitian lebih lanjut dengan mencampurkan RAP dengan bahan limbah padat lainnya untuk meningkatkan ketahanan dari perkerasan jalan tersebut (Sunil et al., 2014 ; Qiao et al., 2019).

4.1.4 Limbah Beton dan Pembongkaran Konstruksi

Limbah Beton dan pembongkaran konstruksi ini berfokus pada *recycle concrete aggregate* (RCA) atau limbah sisa perkerasan beton semen. Limbah beton dan pembongkaran konstruksi dapat dimanfaatkan pada lapisan perkerasan jalan khususnya bagian base course dan sub base. Penggunaan limbah tersebut dapat menurunkan beban dampak lingkungan, konsumsi energi jika dibandingkan dengan penggunaan material alam selama proses produksi (Li et al., 2019). Berbagai penelitian dilakukan untuk mengetahui bagaimana potensi dan kelayakan guna dari limbah beton dan pembongkaran konstruksi pada lapis perkerasan jalan, didapatkan hasil penelitian dengan campuran limbah konstruksi dan pembongkaran pada lapis pondasi perkerasan jalan menurunkan nilai kepadatan dan penurunan penyerapan kadar air. Analisis ini diperlukan untuk melakukan penilaian terhadap desain campuran, fase konstruksi, dan memastikan kinerja ketahanan, keamanan, dan keberlangsungan dari perkerasan jalan tersebut. Proses analisis siklus hidup ini mempertimbangkan faktor beban lalu lintas, persentase dan jenis material yang digunakan, proses penuaan perkerasan, kondisi iklim lokasi konstruksi, dan dampak lingkungan yang ada. Dengan menekankan aspek inti dari siklus hidup mengenai keberlanjutan yang terkait dengan konsumsi energi, emisi karbon selama konstruksi berlangsung (Oreto et al., 2021).

4.1.4.1 Persentase Penggunaan Limbah Beton dan Pembongkaran Konstruksi

Beberapa acuan dalam kajian pustaka pada penggunaan material limbah beton dan pembongkaran perkerasan jalan, bagian ini akan memaparkan mengenai persentase penggunaan, dampak yang didapat dari penggunaan perkerasan limbah beton (RCA) dan aplikasi limbah beton pada perkerasan lentur dan kaku, serta penggunaan limbah beton pada lapisan perkerasan untuk menggantikan material alam, secara detail pada **Tabel 4.5** dan **Tabel 4.6**.

Tabel 4. 5 Persentase Penggunaan Limbah Beton dan Konstruksi Pada Perkerasan Kaku

Peneliti	Persentase Limbah Beton dan Pembongkaran Konstruksi	Parameter Uji
(Kurniawan et al., 2023)	Kandungan Limbah Beton 0%, 25%, 50%, 75%, dan 100%	<ul style="list-style-type: none">• Setiap Kenaikan persentase RCA, slump test menurun• Penurunan kekuatan tekan setiap kenaikan persentase RCA• Kadar optimum penggunaan adalah 25%, masuk dalam batas kekuatan minimum tekan 80%
(Zen et al., 2021)	Kandungan Limbah Beton 0%, 25%, 50%, 75%, dan 100%	<ul style="list-style-type: none">• Kadar 25% limbah beton merupakan kadar optimal dalam mencapai kuat tekan terbaik
(Azam, et al., 2024)	Kandungan Limbah Beton 10%, 20%, dan 30%	<ul style="list-style-type: none">• Setiap kenaikan persentase limbah terdapat penurunan kekuatan• Setiap kenaikan persentase limbah dapat menurunkan dampak lingkungan dan emisi CO₂

Tabel 4. 6 Persentase Penggunaan Limbah Beton dan Konstruksi Pada Perkerasan Lentur

Peneliti	Persentase Limbah Beton Dan Pembongkaran Konstruksi	Parameter Uji
(Imannurrohman et al., 2020)	Kandungan Limbah Beton 0%, 10%, 15%, dan 20%	<ul style="list-style-type: none"> • Aplikasi 15% limbah beton dan 6% kadar aspal menaikkan nilai marshall test
(Prawiro et al., 2014)	Kandungan Limbah Beton 0%, 20%, 40%, 60%, 80%, dan 100%	<ul style="list-style-type: none"> • Peningkatan nilai stabilitas pada penggunaan 20% limbah beton dibandingkan penggunaan batu pecah/material alam
(Jalil & Ridwan, 2020)	31% Agregate yang lolos saringan #16, #30, #50, dan #100	<ul style="list-style-type: none"> • Digunakan pada lapisan base course • Pengantian agregat halus pada base tidak memenuhi standar minimum

4.1.4.2 Regulasi Penggunaan Limbah Beton dan Pembongkaran Konstruksi

Jenis Perkerasan aspal dari limbah beton ini sudah sejak lama digunakan, sebagai contoh Amerika Serikat telah menggunakan limbah beton sejak 1970. Meskipun belum diatur secara detail mengenai penggunaannya, namun limbah beton sudah secara resmi *support* dan diakui sebagai bahan yang digunakan pada *Federal Highway Administration* (FHWA 2002). Penggunaannya dianjurkan untuk lapisan *subbase* dan *base course*, sebagai pengganti sebagian agregat kasar pada campuran jenis perkerasan kaku maupun lentur. Pemanfaatan limbah beton dan pembongkaran konstruksi ini dari sisi ekonomi, lingkungan, sosial, dan transportasi agregat serta penurunan emisi CO₂. Karena bentuk limbah beton dan pembongkaran konstruksi yang bersudut dan lancip, hal ini memberikan kontak antar partikel agregat yang lebih baik, sehingga menghasilkan pondasi jalan yang lebih baik. Dengan proses aplikasi yang baik untuk diaplikasikan pada *subbase* dan *base course* dapat memberikan performa yang lebih baik dari agregat alam (American Concrete Pavement Association, 2020).

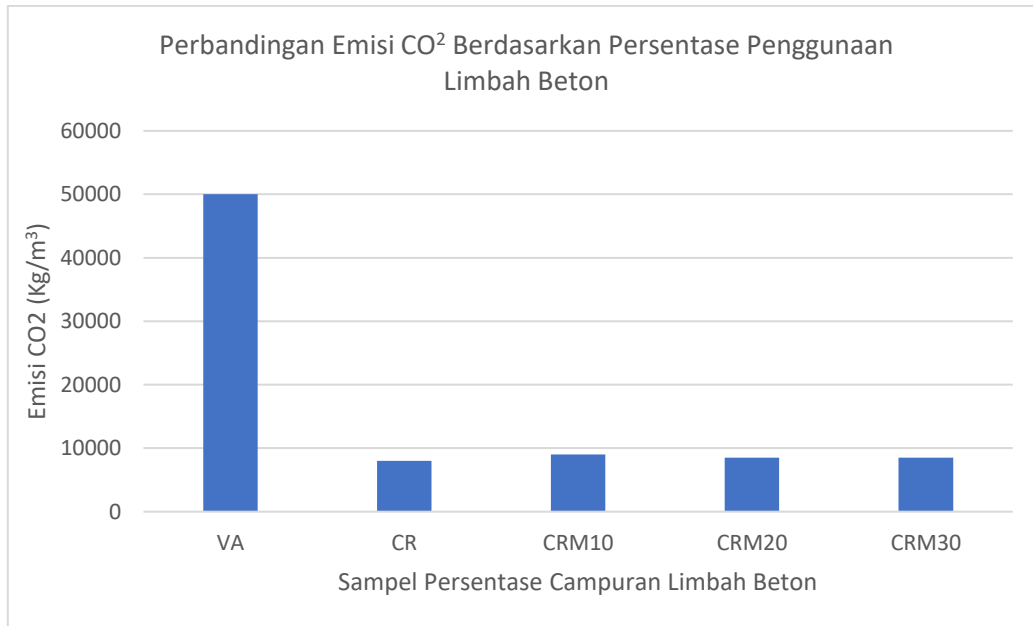
Di Indonesia sendiri juga belum diatur secara detail mengenai penggunaan kembali limbah beton ini. Namun secara general terdapat beberapa peraturan yang mengatur mengenai

penggunaan limbah pada perkerasan jalan. Beberapa peraturan itu antara lain peraturan pemerintah No. 101 Tahun 2014 tentang pengelolaan limbah B3, dalam peraturan ini terdapat pemanfaatan limbah untuk perkerasan jalan. Berikutnya pada peraturan menteri PUPR No 18/PRT/M/2018, yang isi konteks membahas penggunaan material perkerasan jalan, meskipun tidak membahas secara detail mengenai limbah beton dan pembongkaran konstruksi, namun terdapat pembahas penggunaan aspal buton untuk pembangunan dan preservasi jalan. Dan terakhir berupa peraturan menteri PUPR No 5 tahun 2023 mengenai persyaratan teknis jalan dan perencanaan teknis jalan, dalam peraturan ini mencakup aspek lebar badan jalan, bagian ruang pemanfaatan jalur jalan, lalu lintas, bahu jalan, median, dan pemisahan lajur jalan.

4.1.4.3 Life Cycle Assessment (LCA) Fase Konstruksi

Pada fase konstruksi pemanfaatan material limbah beton dan pembongkaran konstruksi khususnya berupa *Recycle Concrete Aggregate* (RCA) dengan alat ukur penilaian *life cycle assessment* (LCA) berdasarkan studi literatur diperoleh hasil berupa dampak lingkungan yang besar dalam fase konstruksi, perbandingan dengan perkerasan jalan konvensional menyumbang emisi berkisar 174.244 kg/t CO₂, data berdasarkan badan statistik European Bitumen Association. Dengan satu ton agregat RCA hanya menghasilkan 0,0024 ton CO₂, jika dibandingkan dengan agregat alam dengan berat satu ton menghasilkan 0,046 ton CO₂, sehingga secara keseluruhan dapat menurunkan emisi karbon sebesar 23-28% jika dibandingkan dengan penggunaan agregat alami (Tam et al., 2018). Secara umum penggunaan RCA menghasilkan pengurangan emisi sebesar 22-65% dibandingkan dengan produksi aspal konvensional dari penelitian terkait melaporkan penurunan emisi gas rumah kaca sebesar 65% dan penghematan energi tak terbarukan hingga 58% (Hossain et al., 2016). Selain itu dari sisi dampak terhadap manusia, penggunaan RCA memiliki penurunan *toksitas* dan dampak risiko kesehatan yang lebih rendah 25% dibandingkan dengan perkerasan aspal konvensional (Shi et al., 2019).

Dalam Prakteknya untuk meningkatkan penilaian terhadap LCA, campuran RCA tersebut dikombinasikan dengan campuran aspal hangat (WMA). Dengan penggunaan aspal hangat yang ditambahkan bahan daur ulang RCA terbukti dapat menurunkan konsumsi energi karena penggunaan aspal dan agregat alam yang lebih sedikit, sehingga kebutuhan energi selama fase produksi hingga konstruksi dari pengolahan bahan mentah hingga proses konstruksi dapat diminimalkan.



Gambar 4. 5 Perbandingan Rata-Rata Emisi CO₂ Pada Sumber Penelitian Dengan Limbah
 Sumber : Azam, A., Gabr, A., Ezzat, H., Arab, M., Alshammari, T. O., Alotaib, E., & Zeiada, W. (2024). Life cycle assessment and pavement performance of recycled aggregates in road construction

Pada **Gambar 4.5** menunjukkan perbandingan emisi gas CO₂ yang dihasilkan dari penggunaan aspal konvensional atau *virgin asphalt* (VA) atau aspal murni pada lapisan pondasinya, untuk penggunaan RCA dikombinasikan dengan beberapa sampel, untuk sampel pertama dengan kode CR yang menandakan penggunaan lapis pondasi pada perkerasan menggunakan 100% RCA, untuk CRM10 sampel berupa campuran 90% RCA dengan 10% berupa campuran pasangan batu bata dan tanah liat atau *recycled clay masonry* (RCM), sampel CRM20 dengan campuran 80% RCA dan 20% RCM, dan sampel CRM30 merupakan sampel dengan campuran 70% RCA dan 30% RCM. Menurut hasil penelitian disimpulkan bahwa dengan 100% RCA mendapatkan hasil yang lebih baik terhadap penurunan emisi CO₂. Selain itu penggunaan campuran batu bata dan tanah liat pada lapisan pondasi pada perkerasan jalan dapat meningkatkan deformasi permanen dan potensi kerugian dari sisi kekuatan, tentu hal ini akan berdampak pada pemeliharaan dan kinerja struktur jalan jangka panjang (Azam et al., 2024).

4.1.4.4 **Life Cycle Assessment (LCA) Fase Operasional**

Penggunaan RCA sebagai bahan dasar perkerasan aspal menawarkan potensi desain yang berkelanjutan, dikarenakan potensi dari penggunaan lapisan perkerasan yang lebih tipis. Hasil penelitian menunjukkan penggunaan RCA menunjukkan lapisan dasar yang dibutuhkan

lebih tipis dibandingkan dengan aspal konvensional dengan desain untuk berbagai kondisi perkerasan jalan. Karena bahan RCA memiliki nilai hisap yang lebih tinggi dibandingkan dengan agregat alam. Meskipun lapisan lebih tipis namun memiliki kinerja yang setara dengan agregat alam pada aspal konvensional yang lebih tebal. studi dengan penelitian langsung yang dilakukan di Phoenix, Arizona menunjukkan hasil lapisan dasar dengan campuran RCA yang jauh lebih tipis dibandingkan dengan aspal konvensional (VA) dengan 33% untuk bagian tengah aspal dan 45% untuk di bagian sisi. Dengan lapisan dasar yang lebih tipis secara langsung berdampak signifikan terhadap penghematan biaya dan sumber daya. Selain itu juga lapis perkerasan dasar yang lebih tipis juga memungkinkan konsumsi material yang lebih rendah dan juga dampak lingkungan yang lebih rendah (Azam et al., 2024).

Dari hasil penelitian mengenai kebutuhan ketebalan bahan yang diperlukan untuk pembuatan perkerasan jalan satu jalur dengan lebar 3,65 meter, untuk mendapatkan hasil kekuatan pengujian yang sesuai dengan standar AASHTO maka penggunaan RCA membutuhkan lapisan ketebalan yang lebih tipis di berbagai jenis sampel campuran dengan kondisi benda uji yang bervariasi.

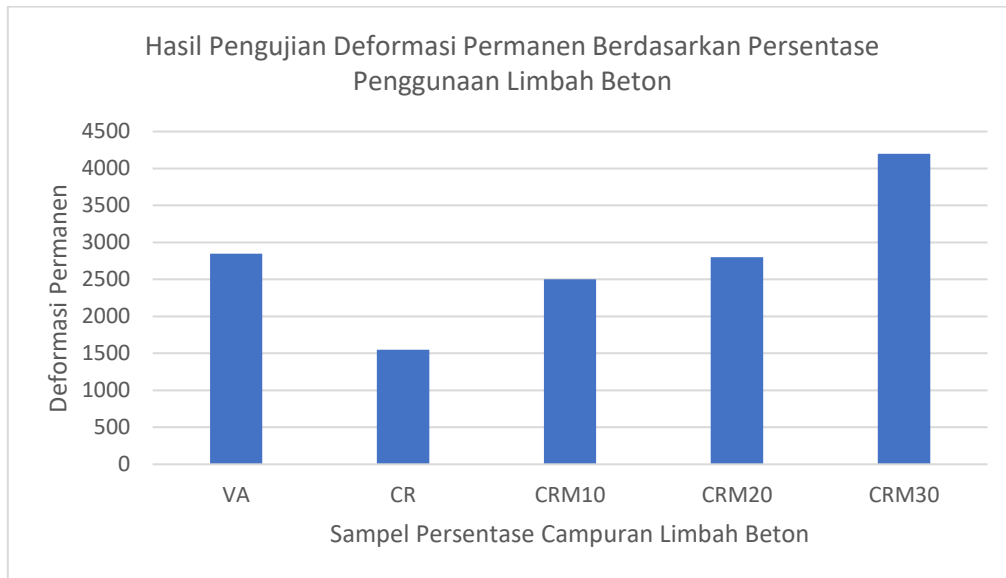
4.1.4.5 Life Cycle Assessment (LCA) Fase Pemeliharaan

Proses pemeliharaan perkerasan jalan dengan campuran RCA dengan proses penggilingan dan pelapisan ulang aspal dengan umur rencana pemakaian selama 20 tahun. Proses pemeliharaan dilakukan dengan cara menghilangkan lapisan aspal lama setebal 1 inci, dan dilakukan pengaspalan ulang untuk mencapai kinerja sesuai dengan desain konstruksi awal. Lapisan aspal konvensional masih diperlukan sebagai lapisan atas untuk tetap mempertahankan kinerja yang sesuai dengan standar AASHTO. Untuk menentukan ketebalan dari pengaspalan ulang didapat dengan mempertimbangkan kondisi jalan yang akan dilakukan *overlay* (Azam et al., 2024).

4.1.4.6 Life Cycle Assessment (LCA) Fase Umur Akhir Rencana

Umur akhir dari perkerasan dengan campuran RCA pada penelitian menyesuaikan dengan standar desain AASHTO 20 tahun umur pemakaian jalan, dengan kriteria umur akhir rencana ketika lapis perkerasan mengalami kegagalan struktural pada perkerasan akibat alur dan *fatigue* maupun keduanya pada saat proses pengujian kelayakan perkerasan jalan. Untuk mendapatkan umur masa pakai yang sama dengan aspal konvensional diperlukan penyesuaian perkerasan perkerasan RCA dengan aspal konvensional, untuk itu pada penelitian ini ketebalan lapisan dasar diubah untuk mencapai masa pakai yang serupa dengan perkerasan konvensional. Dari beberapa percobaan dengan sampel penelitian terkait penggunaan RCA pada perkerasan

jalan di dapatkan campuran RCA murni dengan kode sampel (CR) memiliki dampak yang signifikan untuk digunakan (Azam et al., 2024). Hal ini juga melihat potensi penggunaan limbah, dampak lingkungan terkait, dan mengacu terhadap LCA yang lebih baik jika dibandingkan dengan perkerasan konvensional. **Gambar 4.6** merupakan hasil pengujian di laboratorium berupa simulasi deformasi permanen pada masa umur pakai perkerasan jalan .



Gambar 4. 6 Rata-Rata Hasil Pengujian Deformasi Permanen Pada Sampel Perkerasan Jalan Dari Beberapa literatur Penelitian

Sumber : Azam, A., Gabr, A., Ezzat, H., Arab, M., Alshammari, T. O., Alotaib, E., & Zeiada, W. (2024). Life cycle assessment and pavement performance of recycled aggregates in road construction

4.1.5 Limbah *Fly Ash* dan *Bottom Ash* (FABA)

Fly ash (FA) biasanya digunakan sebagai campuran pada aspal yang dicampurkan sebagai *filler* maupun diolah kembali sebagai campuran polimer pada aspal. Ukuran partikel FA sendiri berkira antara 10 dan 100 μm , sehingga dari bentuk ukuran ini yang menjadikan FA cocok sebagai *filler* pada campuran aspal pengganti agregat *filler* alam yang ada. FA sendiri secara bahan dan kriteria sendiri memiliki nilai yang setara dengan pasir dan memenuhi persyaratan sebagai campuran beraspal, sehingga dapat disimpulkan FA dapat digunakan sebagai agregat halus hingga pengisi dengan kualitas yang tinggi (Nur Fauziah, 2023).

Abu dasar (*bottom ash*) digunakan sebagai lapisan subbase dapat mengurangi konsumsi energi dan hanya mengeluarkan sedikit emisi gas rumah kaca, penggunaan energi tertinggi pada LCA limbah *bottom ash* adalah pada jarak transportasi pada setiap proses pengolahan limbah

tersebut. Namun pada prosesnya perlu dipertimbangkan mengenai kadar kontaminasi dari *bottom ash* terhadap tanah tempat diaplikasikan yang berdampak pada pencemaran tanah dan air disekitarnya.

4.1.5.1 Persentase Penggunaan Limbah Fly Ash dan Bottom Ash (FABA)

Beberapa acuan dalam kajian pustaka pada penggunaan material limbah FABA sebagai campuran material perkerasan jalan, bagian ini akan memaparkan mengenai persentase penggunaan, aplikasi limbah FABA pada perkerasan kaku dan lentur, aplikasi limbah FABA pada lapisan perkerasan jalan, dampak yang didapat dari penggunaan perkerasan limbah FABA kadar optimal penggunaan limbah FABA pada perkerasan jalan untuk mencapai konstruksi perkerasan jalan hijau pada **Tabel 4.7** dan **Tabel 4.8**.

Tabel 4. 7 Persentase Penggunaan Limbah *Fly Ash* dan *Bottom Ash* (FABA) Pada Perkerasan Kaku

Peneliti	Persentase Limbah <i>Fly ash</i> dan <i>Bottom Ash</i> (FABA)	Parameter Uji
(Nur Fauziah, 2023)	Campuran FABA dengan kadar 25%, 50%, 75%, dan 100% dari total berat filler	<ul style="list-style-type: none"> • Nilai VFB mengalami kenaikan setiap penambahan persentase FABA • Nilai VMA dan VIM mengalami penurunan setiap kenaikan persentase • Untuk Aplikasi Sebagai filler kadar terbaik adalah 50% dari berat total <i>mix desain</i>
(Samosir et al., 2021)	Variasi campuran 0% FABA, 22% FA dan 25% BA, 25% FA dan 25% BA	<ul style="list-style-type: none"> • Campuran terbaik adalah 22% FA dan 25 BA • Hasil Pengujian CBR 93%, sesuai dengan standar minimum 60%
(Gunawan et al., 2019)	Kadar 20% FA dan 80% BA, kadar Fa < 10%	<ul style="list-style-type: none"> • Kadar FA <10% Meningkatkan kekuatan tekan sebesar 22 kg/cm²

Peneliti	Persentase Limbah <i>Fly ash</i> dan <i>Bottom Ash</i> (FABA)	Parameter Uji
		<ul style="list-style-type: none"> • FA 20% dan BA 80% memenuhi persyaratan tekan 25 kg/cm² • Penggunaan semen dibatasi 10% agar mendapat dampak lingkungan terbaik

Tabel 4. 8 Persentase Penggunaan Limbah *Fly Ash* dan *Bottom Ash* (FABA) Pada Perkerasan Lentur

Peneliti	Persentase Limbah <i>Fly ash</i> dan <i>Bottom Ash</i> (FABA)	Parameter Uji
(Samosir et al., 2019)	Campuran 55% FA dan 45% BA, 75% FA dan 25% BA	<ul style="list-style-type: none"> • Aplikasi pada lapisan Sub base Course • Meningkatkan daya dukung tanah • Nilai CBR 90%
(Wang et al., 2024)	Campuran BA sebanyak 20%, 30%, dan 40%	<ul style="list-style-type: none"> • Penurunan emisi carbon sebanyak 17.369,9 ton • Peningkatan penggunaan aspal, faktor dari BA yang porus

4.1.5.2 Regulasi Penggunaan Limbah *Fly Ash* dan *Bottom Ash* (FABA)

Beberapa regulasi terkait penggunaan limbah *fly ash* (FA) dan *bottom ash* (BA) pada perkerasan jalan di Indonesia, diatur pada Peraturan Pemerintah No. 22 Tahun 2021 yang berisikan bahwa FABA bukan lagi bahan limbah beracun dan bukan kategori limbah BA untuk itu penggunaan FABA dalam perkerasan jalan diperbolehkan (KLHK, 2021). Untuk regulasi penggunaan limbah FABA di luar negeri, karena penggunaan limbah FABA sudah sejak 1950 digunakan di Amerika Serikat maka pada tahun 1974 oleh *Federal Highway Administration* mengizinkan penggunaan *Fly ash* sebagai pengganti semen (Bureau of Transportation Statistics,

2003). Di India mewajibkan penggunaan *fly ash* sebagai bahan timbunan *flyover* dalam radius 300 km dari pembangkit listrik *thermal* (Mathur, P., 2018).

4.1.5.3 Life Cycle Assessment (LCA) Fase Konstruksi

Fly ash dan *Bottom ash* biasanya digunakan pada campuran perkerasan kaku, penggunaan bahan dasar tambahan FABA menjadi hal yang umum digunakan pada produksi beton dan juga manfaat teknis dari agregat alternatif. *Fly ash* sendiri digunakan sebagai pengganti *klinker* semen, dengan campuran *fly ash* dapat menurunkan penggunaan energi baik dari kegiatan produksi campuran semen maupun tahap pencampuran semen pada fase konstruksi berlangsung. Perkerasan dengan campuran *fly ash* di desain dengan lapisan beton perkerasan setebal 250 mm dan lapisan anti selip di atasnya tebal 40 mm (Anastasiou et al., 2015).

Penggunaan *bottom ash* sebanyak 20-30% menggantikan pasir ini berdampak pada pengurangan konsumsi energi sekitar 24,55 MJ dan mengurangi emisi karbon sekitar 85,7 t. Selain itu penggunaan BA juga dapat diolah menjadi *base course* dan *sub base*, dengan proporsi BA pada mortar semen sebanyak 40% dapat meningkatkan kekuatan tekan dan kuat lentur, dengan demikian rasio pencampuran dari BA dapat membuat kinerja perkerasan jalan menjadi lebih baik dan penghematan energi yang mencapai hasil optimal (Wang et al., 2024).

4.1.5.4 Life Cycle Assessment (LCA) Fase Operasional

Fly ash disini dapat digunakan sebagai bahan tambahan dalam campuran semen, namun juga dapat digunakan sebagai pengganti pada lapis perkerasan beton pada lapisan *base* dan *subbase* dengan adanya *fly ash* dapat menggantikan 15% campuran semen, dan pada penelitian terkait dapat menggantikan hingga 100% kerikil alam. Dengan demikian biaya konstruksi hingga masa pemakaian dari perkerasan jalan terbukti menghemat hingga 21% biaya dibandingkan dengan perkerasan beton konvensional. Selain itu penggunaan *fly ash* juga dapat dicampurkan dengan agregat limbah beton dari sisa pembongkaran bangunan.

Pada masa operasional limbah *bottom ash* (BA) belum tersedia mengenai data pengujian lapangan pada fase operasional, untuk itu hasil pengujian laboratorium yang mempresentasikan hasil di lapangan, untuk itu pada penelitian terkait penggunaan perkerasan dengan limbah BA mengikuti tebal lapis perkerasan pada umumnya yaitu 2 inci untuk umur rencana perkerasan selama 20 tahun (Golestani et al., 2017).

4.1.5.5 Life Cycle Assessment (LCA) Fase Pemeliharaan

Proses pemeliharaan perkerasan jalan dengan beton yang dicampurkan dengan limbah *fly ash* dan agregat dari limbah beton dinilai memberikan dampak yang lebih baik, dan nilai

kekuatan yang baik, yang hampir setara dengan perkerasan beton konvensional. Berdasarkan penelitian penggunaan perkerasan jalan limbah beton dan *fly ash* ini dapat mengurangi biaya perawatan hingga 13.630 yuan selama umur desain perkerasan jalan. Hal ini dapat terjadi karena pada umumnya perkerasan beton memerlukan bahan penstabil seperti semen *portland* dan *foamed asphalt*, dimana kedua bahan tersebut merupakan bahan yang mahal dan menimbulkan dampak lingkungan dari emisi gas, terutama pada penggunaan semen *portland*, oleh karena itu penggunaan *fly ash* sebagai salah satu campuran bahan penstabil dapat menekan biaya dan dampak lingkungan yang ada (Li et al., 2019).

Untuk pemeliharaan *bottom ash* (BA) berdasarkan skenario terkait dengan fase pemeliharaan maka konsumsi energi mengalami penurunan hingga 23.182 MJ dan emisi karbon berkurang 1047 t dengan kadar 40% BA atau kurang lebih 2700 - 10700 t, untuk rasio studi kasus jalan perkotaan dengan panjang 340 kilometer (Wang et al., 2024).

4.1.5.6 Life Cycle Assessment (LCA) Fase Akhir Umur Rencana

Dengan desain umur rencana perkerasan jalan selama 20 tahun pada campuran perkerasan jalan dengan limbah *fly ash* dan *bottom ash* menunjukkan total CO₂ yang dihasilkan dari tahap konstruksi, operasional, dan pemeliharaan hingga umur akhir rencana lebih sedikit sebanyak 15,5%. Angka tersebut akan mengalami penurunan sekitar 3,6% karena faktor lain seperti pemeliharaan yang lebih sering dibandingkan sampel kontrol. Untuk itu perlunya dicampurkan dengan limbah lainnya agar mendapat angka dampak lingkungan yang lebih baik. Secara umum emisi dan energy yang dihasilkan dari penggunaan limbah *fly ash* dan *bottom ash* menggantikan agregat alam terlihat signifikan pada tahap konstruksi, namun dalam masa pemeliharaan terdapat penurunan yang cukup tajam karena interval pemeliharaan yang cukup sering. Secara biaya dari masa konstruksi hingga pemeliharaan lebih murah 46% dibandingkan dengan hanya menggunakan agregat alam (Golestani et al., 2017).

4.1.6 Limbah Serbuk Kayu

Negara-negara penghasil kayu terbesar setidaknya menghasilkan limbah serbuk kayu lebih dari 2 juta m³ setiap tahunnya. Limbah serbuk kayu ini cenderung dibuang tanpa pengolahan yang menyebabkan dampak lingkungan terkait polusi udara, emisi gas rumah kaca, dan pencemaran lingkungan. Beberapa penemuan mengungkapkan serbuk gergaji menjadi komposit konstruksi dengan karakteristik modulus elastisitas, penyerapan air, dan karakter kekuatan yang baik yang memenuhi berbagai standar internasional. Sebagai contoh penggunaan serbuk gergaji sebagai pengganti pasir alam sebanyak 5%-17% dan didapatkan hasil untuk desain

rencana 20 MPa, memiliki kekuatan tekan yang lebih tinggi berkisar 3 MPa. Hal ini yang menjadikan acuan bahwa limbah dari serbuk gergaji memiliki potensi yang baik pada aplikasi perkerasan jalan (Mwango & Kambole, 2019). Dengan penggunaan limbah serbuk gergaji dapat menurunkan kebisingan pada perkerasan jalan, penurunan potensi pencemaran lingkungan, penghematan energi, dan pemanfaatan limbah serbuk gergaji yang cenderung dibuang tanpa pemanfaatan lebih lanjut.

4.1.6.1 Persentase Penggunaan Limbah Serbuk Kayu

Beberapa acuan dalam kajian pustaka berupa skala penelitian laboratorium pada penggunaan material limbah Serbuk kayu sebagai campuran material perkerasan jalan, bagian ini akan memaparkan mengenai persentase penggunaan, aplikasi limbah serbuk kayu pada perkerasan kaku dan lentur, aplikasi pada bagian lapisan perkerasan, dan juga kadar optimal dari penggunaan limbah serbuk kayu yang dipaparkan pada **Tabel 4.9** dan **Tabel 4.10**.

Tabel 4. 9 Persentase Penggunaan Limbah Serbuk Kayu Pada Perkerasan Kaku

Peneliti	Persentase Limbah Serbuk Kayu	Parameter Uji
(Mwango & Kambole, 2019)	Pengganti 5% - 15% Serbuk kayu sebagai agregat halus	<ul style="list-style-type: none"> Persentase 15% dapat memenuhi desain rencana 20 MPa
(Olaiya et al., 2023)	Penggunaan 0%, 5%, 10%, 15%, 20%, 25%, dan 30%	<ul style="list-style-type: none"> Kadar maksimum adalah 15%, Jika digunakan lebih maka akan mengalami penurunan kekuatan tekan
(Ejelioku Edeh et al., 2014)	Penggunaan 10% - 100% Serbuk Kayu	<ul style="list-style-type: none"> Kadar optimum 30% serbuk kayu, penggunaan lebih dari 30% mengalami penurunan kekuatan tekan

Tabel 4. 10 Persentase Penggunaan Limbah Serbuk Kayu Pada Perkerasan Lentur

Peneliti	Persentase Limbah Serbuk Kayu	Parameter Uji
(Zhang et al., 2022)	Penggunaan 5%-20% limbah serbuk kayu	<ul style="list-style-type: none"> • Dapat meningkatkan kinerja aspal dasar dengan meningkatkan viskositas • Digunakan sebagai sub base course dapat meningkatkan stabilitas tanah dasar
(Yuslinggan Cahya et al., 2018)	Penggunaan 0%, 25%, 50%, dan 75% Serbuk kayu	<ul style="list-style-type: none"> • Pada persentase manapun yang dikombinasi penetrasi aspal 60/70 memenuhi persyaratan sebagai <i>surface course</i>
(Iskak Imananto & Munasih, 2020)	Kadar Serbuk Kayu 10%, 20%, 30%, 40%, dan 50%	<ul style="list-style-type: none"> • Penggunaan 50% mengalami penurunan pengujian marshall test, namun masih dalam persyaratan <i>Asphalt Treated Base</i>

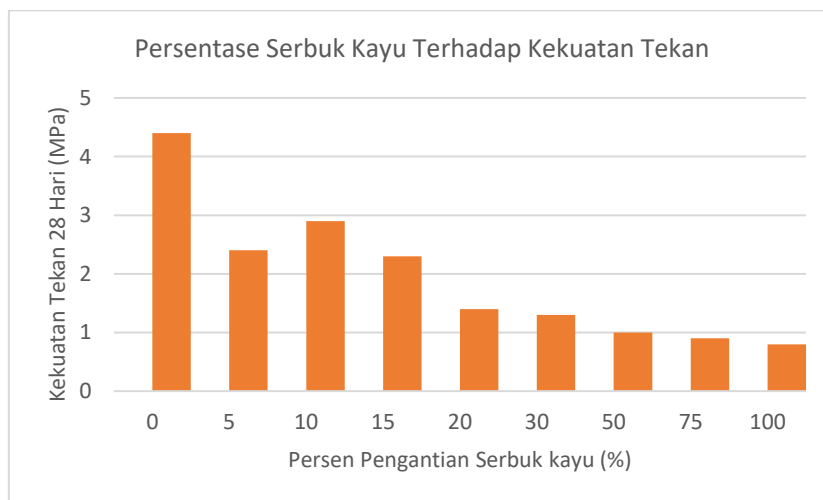
4.1.6.2 Regulasi Penggunaan Limbah Serbuk Kayu

Belum secara detail diatur mengenai penggunaan serbuk kayu dan jenis serbuk kayu yang dapat digunakan pada perkerasan jalan. Namun secara general mengenai perkerasan jalan dapat mengacu pada peraturan menteri pekerjaan umum dan perumahan rakyat (PUPR) No 5 tahun 2023 yang berisikan mengenai pemanfaatan, pelaksanaan, dan tata cara yang mengatur perkerasan jalan di Indonesia,. Selain itu juga terdapat acuan pada Manual Desain Perkerasan (MDP) 2024 yang diterbitkan oleh Direktorat Jenderal Bina Marga yang berisikan pedoman dalam desain perkerasan jalan dan memberikan informasi lebih lanjut dalam penggunaan serbuk kayu dalam perkerasan jalan

4.1.6.3 *Life Cycle Assessment (LCA)* Fase Konstruksi

Perkerasan jalan kaku dengan campuran serbuk gergaji menjadikan potensi perkerasan ramah lingkungan dan berkelanjutan. Pada tahap konstruksi ini material dibuat dengan mencampurkan serbuk kayu dari hasil sisa gergaji pada campuran bahan pengikat seperti semen

maupun aspal. Salah satu keuntungan penggunaan serbuk kayu adalah biaya yang rendah dan ketersediaannya melimpah, terutama di negara-negara penghasil kayu, dengan pemanfaatan ini dapat menurunkan limbah serbuk kayu dan menurunkan biaya konstruksi. Hasil penelitian terkait dengan menggunakan pasir alam dengan serbuk gergaji hingga abu dari serbuk gergaji sebagai pengganti campuran semen dengan persentase antara 5% - 15%. Jika di campurkan sebagai pengganti semen maka beton akan mengalami penurunan kekuatan secara drastis, untuk itu lebih direkomendasikan untuk bagian non struktural (Olaiya et al., 2023). Penelitian lainnya juga membatasi sebanyak 15% maksimum campuran serbuk gergaji pada perkerasan jalan karena jika digunakan persentase lebih tinggi akan menurunkan kekuatan dan durabilitas pada perkerasan jalan pada **Gambar 4.7** (Mwango & Kambole, 2019). Seiring dengan penggunaan serbuk gergaji ini sangat membantu dalam menciptakan konstruksi jalan yang ramah lingkungan dengan meminimalkan pengeluaran CO₂ yang berhubungan langsung dengan kegiatan konstruksi dan juga melestarikan sumber daya bangunan yang tidak terbarukan.



Gambar 4. 7 Hasil Pengujian Tekan Dari Sumber Literatur Dengan Sampel Benda Uji Penggantian Pasir Pada Limbah Serbuk Kayu

Sumber : Mwango, A., & Kambole, C. (2019). Engineering Characteristics and Potential Increased Utilisation of Sawdust Composites in Construction

4.1.6.4 *Life Cycle Assessment (LCA) Fase Operasional*

Penggunaan Serbuk kayu pada fase operasional perkerasan perkerasan jalan, berdasarkan data simulasi pengujian laboratorium terhadap penggunaan perkerasan jalan maka di dapat mengurangi sensitifitas suhu, meningkatkan kinerja suhu rendah, kinerja anti penuaan jika di oleh lebih lanjut pada emulsi aspal, pada kinerja suhu tinggi berdasarkan pada persentase serbuk kayu, semakin tinggi maka akan menurun efektivitasnya. Selain itu melalui pengujian

didapatkan dapat meningkatkan efek ketahanan terhadap fatigue, ketahanan retak, dan pada perkerasan asal meningkatkan ketahanan terhadap sensitivitas kelembaban (Zhang et al., 2022). Pada pengguna perkerasan jalan dampak yang paling dapat dirasakan adalah penurunan kebisingan pada perkerasan jalan, karena sifat dari serbuk kayu yang dapat menyerap suara sehingga berdampak pada penurunan kebisingan. Dengan penambahan serbuk kayu sebanyak 15% dan dapat ditambahkan bahan limbah lainnya seperti karet bekas ini berdampak pada penurunan frekuensi kebisingan dengan minimum ketebalan 15 mm. Selain itu dampak biaya penggunaan pada fase operasional lebih murah dibandingkan dengan material tradisional. Dalam fase operasional karena serbuk kayu merupakan material organik yang bersifat tidak beracun sehingga tidak akan meningkatkan bahaya kesehatan dan efek terhadap lingkungan, komposisi serbuk kayu tidak menghasilkan debu dan bahan kimia berbahaya seperti material alam ataupun penggunaan limbah material lainnya (Olaiya et al., 2023). Untuk saat ini masih perlunya pengujian secara langsung pada perkerasan jalan untuk mengetahui efektivitas biaya, efektivitas energi, daya tahan yang secara nyata.

4.1.6.5 *Life Cycle Assessment (LCA) Fase Pemeliharaan*

Serbuk kayu merupakan bahan organik yang sewaktu-waktu dapat mengalami pembusukan dan nantinya akan mengalami penurunan kualitas dan kekuatan dari perkerasan jalan tersebut. Hal ini terjadi karena saat terjadi penurunan ini akan melemahkan interaksi antara material agregat halus pengganti serbuk kayu dengan pengikat (semen atau aspal). Untuk itu akan berdampak pada proses pemeliharaan perkerasan jalan yang lebih sering. Kandungan dalam serbuk kayu seperti air, oksigen dan senyawa ringan lainnya dapat menyebabkan keausan yang lebih cepat dan ketahanan terhadap bekas roda. Untuk itu beberapa rekomendasi peneliti pemanfaatan serbuk kayu sebagai material tanah dasar untuk meningkatkan daya dukung tanah dengan cara penimbunan langsung, sehingga tetap dapat meningkatkan dampak lingkungan dibandingkan tidak melakukan pengolahan limbah serbuk kayu ini (Zhang et al., 2022). Namun pada beberapa sumber penelitian belum secara detail menjelaskan mengenai proses pemeliharaan dan faktor dari penurunan kualitas perkerasan jalan sehingga memerlukan proses pemeliharaan.

4.1.6.6 *Life Cycle Assessment (LCA) Fase Umur Akhir Rencana*

Fase umur akhir rencana pada perkerasan jalan kaku maupun lentur pada campuran limbah serbuk kayu ini belum dapat dipaparkan karena keterbatasan data terkait penelitian dan pemanfaatannya secara langsung pada perkerasan jalan. Hal ini terkait dengan limbah serbuk kayu yang digunakan hanya sebatas pengujian-pengujian melalui laboratorium mengenai

karakteristik, sifat material, dan rekomendasi terhadap kesesuaian pada aplikasi perkerasan jalan. Umumnya dari beberapa penelitian terkait didapatkan bahwa limbah serbuk kayu dapat diaplikasikan pada perkerasan jalan kaku maupun lentur, namun keterbatasan penelitian terkait ketahanan material organik pada serbuk kayu ini menjadi limitasi dalam penelitian ini. Penelitian terkait yang sudah diaplikasikan penggunaan serbuk kayu hanya pada lapisan *subbase* sebagai timbunan tanah dasar untuk meningkatkan kekuatan dan stabilitas pada tanah dasar (Zhang et al., 2022).

4.2 Teknologi Pada Perkerasan Jalan

Di era saat ini perkembangan teknologi yang sangat pesat juga terjadi di sektor konstruksi khususnya konstruksi perkerasan jalan. Dengan adanya inovasi-inovasi teknologi baru yang akan diterapkan pada perkerasan jalan ini diharapkan dapat memberikan dampak yang signifikan terhadap keberlangsungan konstruksi jalan hijau. Inovasi ini dapat berupa peningkatan mutu dan kualitas pada perkerasan jalan, penggunaan bahan yang ramah lingkungan, dan peningkatan lainnya yang berdampak pada lingkungan. Teknologi ini berpotensi untuk mengurangi emisi karbon hingga 28% untuk jalan dengan perkerasan kaku dan hingga 37% untuk jalan perkerasan lentur (Direktorat Bina Marga, 2018). Untuk itu beberapa inovasi teknologi yang berpotensi diimplementasikan pada perkerasan jalan.

4.2.1 Teknologi *Bio-Oil*

Penggunaan *Bio-oil* ini berfokus pada minyak jelantah dari sisa penggorengan dari oli mesin, penggunaannya dengan cara di ekstraksi dan dipanaskan pada suhu 135 derajat celcius selama kurang lebih dua jam kemudian dilakukan pencampuran secara langsung yang berfungsi sebagai anti penuaan pada pengikat aspal modifikasi *polimer* (PMA) dan (*Reclaimed Asphalt Pavement* RAP). Berdasarkan penelitian *bio-oil* dapat digunakan sebagai peremajaan ramah lingkungan pada industri perkerasan aspal. *Rejuvenator* ini bekerja layaknya aditif peremajaan lainnya dengan mengurangi dan mempertahankan tingkat oksidasi seperti pada aspal murni, yang diamati dari proses penuaan aspal baru dengan kandungan RAP yang lebih lambat dibandingkan hanya menggunakan aspal murni (Li et al., 2024).

4.2.1.1 Persentase Penggunaan *Bio-Oil*

Beberapa kajian pustaka berupa skala penelitian laboratorium pada penggunaan teknologi *bio-oil* sebagai *rejuvenator* perkerasan jalan, bagian ini akan memaparkan mengenai persentase penggunaan, dampak yang didapat dari penggunaan teknologi *bio-oil* sebagai

rejuvenator perkerasan jalan dan penggunaan material limbah industri dengan teknologi perkerasan jalan yang dipaparkan pada **Tabel 4.11**.

Tabel 4. 11 Pengaruh Penggunaan Teknologi *Bio-Oil* Sebagai *Rejuvenator* Berdasarkan Penelitian

Peneliti	Persentase <i>Bio-Oil</i> Pada Limbah Industri	Parameter Uji
(Abdalla, Faheem, & Walters, 2022)	Penggunaan 15%, 30%, 50%, 80%, dan 100%	<ul style="list-style-type: none"> • Kadar 80% dapat menurunkan efek buruk lingkungan • Penambahan limbah FA, perlu diperhatikan dampak toksisitas
(Abdalla, Faheem, & Ayranci, 2022)	5% dari berat total campuran aspal dasar	<ul style="list-style-type: none"> • Pengurangan laju penuaan • Peningkatan sifat reologi • Menurunkan tingkat oksidasi • Peningkatan reaksi suhu renda
(Elbori et al., 2022)	Penggunaan 10%, 15%, 20%, 25%, dan 30%	<ul style="list-style-type: none"> • Kandungan 25% dengan RAP merupakan kandungan optimal, nampak pada perbaikan viskositas, rutting, dan titik lunak
(Zhang et al., 2020)	70%-90% dari berat total campuran aspal dasar	<ul style="list-style-type: none"> • Setiap peningkatan 5% <i>bio-oil</i> pada Rap dapat melunakkan perkerasan • Peningkatan nilai Penetrasi

4.2.1.2 Regulasi Penggunaan *Bio-Oil*

Untuk saat ini belum secara detail mengatur regulasi pada penggunaan *bio-oil* pada perkerasan jalan. Meskipun demikian untuk proses pengujian dan pengaplikasian perkerasan *bio-oil* kedepannya dapat mengacu pada peraturan perkerasan jalan secara general, seperti

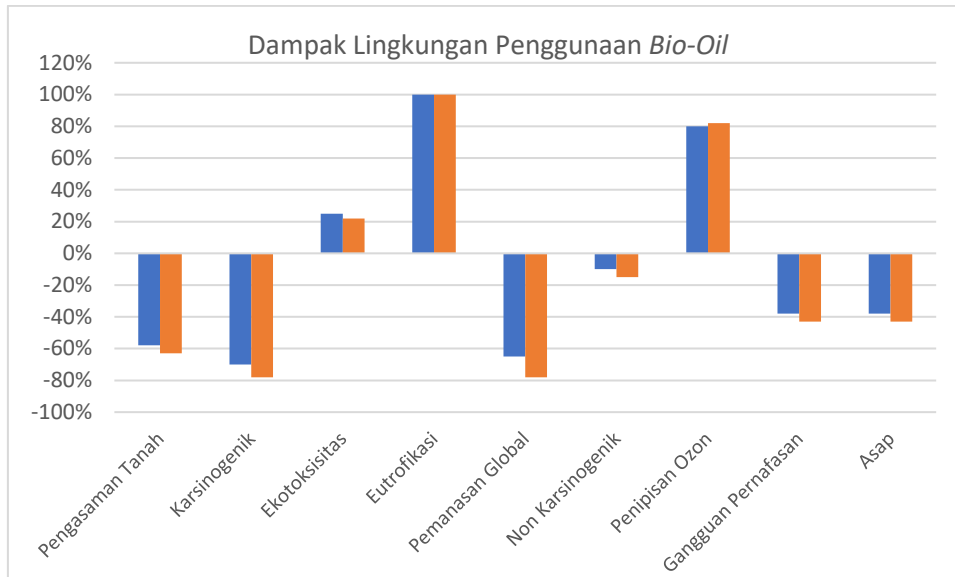
Manual Desain Perkerasan Jalan (MDP) 2024, pada manual ini terdapat panduan mengenai desain struktur perkerasan yang relevan, dan kondisi perkerasan jalan di Indonesia. Sumber lainnya berasal dari Peraturan Menteri Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat (PUPR) no 5 Tahun 2023 yang menetapkan syarat teknis pada perkerasan jalan. Dengan acuan peraturan dan manual pelaksanaan ini dapat menjadikan gambaran terhadap standar perkerasan jalan di Indonesia.

4.2.1.3 Life Cycle Assessment (LCA) Fase Konstruksi

Tahap konstruksi dengan mencampurkan aspal RAP dengan *bio-oil* sebagai *rejuvenator* dan aditif tambahan seperti kapur maupun semen. Selain itu dilakukan pengambilan hasil sampel di lapangan untuk mengetahui efisiensi dari aditif peremaja dan juga melakukan evaluasi untuk dilakukan penelitian lebih lanjut. Proses pengambilan data dilapangan dengan indikator dari *Fourier Transform Infrared Spectroscopy* (FTIR) dan Parameter *Glover Rowe* (GR), hasil penelitian tersebut menunjukkan manfaat *bio-oil* sebagai zat peremaja ramah lingkungan dalam industri perkerasan aspal. *Rejuvenator* dari *bio-oil* memiliki cara kerja yang mirip dengan aditif *rejuvenator* lainnya, dengan cara mengurangi atau mempertahankan tingkat oksidasi dalam campuran aspal daur ulang seperti pada jenis aspal baru, sehingga ditunjukkan dengan tingkat proses penuaan aspal RAP yang lebih lambat. Adapun penambahan *offspec fly ash* (OFA) dengan perbandingan 1:2 *bio-oil* dengan OFA menunjukkan hasil kebutuhan energy untuk proses pembuatan 1 kg aspal *rejuvenator* yang lebih minimum (Abdalla, Faheem, & Ayranci, 2022).

4.2.1.4 Life Cycle Assessment (LCA) Fase Operasional

Penilaian siklus hidup pada masa operasional perkerasan jalan bertujuan memberikan gambaran terhadap permasalahan dampak lingkungan yang ditimbulkan, kesehatan manusia dan ketersediaan sumber daya alam yang ada. Dalam kasus penggunaan *bio-oil* fase operasional pada perkerasan aspal dibagi beberapa dampak lingkungan seperti pemanasan global, penipisan ozon, eutrofikasi, kesehatan manusia, dan dampak *toksistas*.



Gambar 4. 8 Grafik Dampak Lingkungan Dari Berbagai Jenis Sampel Pengujian *Bio-Oil*

Sumber : Abdalla, A., Faheem, A. F., & Walters, E. (2022). Life cycle assessment of eco-friendly asphalt pavement involving multi-recycled materials: A comparative study

Penyelidikan lanjutan dilakukan dengan melakukan pencampuran RAP dengan *rejuvenator bio-oil* dan tanpa *rejuvenator* dengan kadar RAP 0%-100% pada **Gambar 4.8**. Sampel LC80-R dan LC100-R merupakan sampel dengan campuran 80% dan 100% RAP dengan campuran *rejuvenator* murni berupa *bio-oil* yang di ekstraksi. Didapatkan hasil bahwa *rejuvenator* berupa *bio-oil* menimbulkan dampak negatif seperti muncul tingkat *toksistas*, *eutrofikasi*, dan penipisan lapisan ozon dari proses penguapan selama ekstraksi *bio-oil* berlangsung. Untuk itu perlunya campuran aditif dari *bio-oil* dengan *fly ash* (OFA) untuk menekan dampak dari proses pengaplikasian *bio-oil* pada perkerasan aspal tua (Abdalla, Faheem, & Walters, 2022).

4.2.1.5 *Life Cycle Assessment* (LCA) Fase Pemeliharaan

Karakter dari *bio-oil* yang digunakan sebagai aditif peremaja aspal yang sudah tua ini memberikan ketahanan terhadap aspal RAP dibandingkan tanpa campuran *rejuvenator*, setidaknya dengan penambahan *rejuvenator* ini dapat meningkatkan ketahanan aspal sebanyak 10%. Hal ini mendasari cara kerja dari *rejuvenator* yang memperlambat proses penuaan, Namun jika dibandingkan dengan aspal murni *bio-oil* tidak dapat mengembalikan kinerja perkerasan pada suhu tinggi, kerentanan terhadap kelembaban, dan ketahanan terhadap *fatigue* yang tidak dapat dikembalikan seperti agregat murni. Dari siklus hidup perkerasan jalan dengan campuran *rejuvenator bio-oil* menghasilkan emisi gas rumah kaca paling sedikit dibandingkan dengan aspal konvensional maupun perkerasan RAP dengan aditif kimia lainnya. meninjau dari sudut biaya

perkerasan dengan *rejuvenator bio-oil* dan RAP ini menunjukkan penghematan sebesar 40% dibandingkan campuran aspal konvensional (Zhang et al., 2020).

4.2.1.6 Life Cycle Assessment (LCA) Fase Umur Akhir Rencana

Umur akhir dari perkerasan jalan dengan *bio-oil* ini berupa peninjauan terhadap hasil pengujian kinerja pada perkerasan jalan. Meskipun belum banyak pembahasan mengenai umur akhir dari perencanaan *bio-oil* ini, namun pada beberapa penelitian mengacu pada hasil data laboratorium. Hasil penelitian pencampuran *bio-oil* pada RAP dapat meningkatkan umur dari *fatigue* pada campuran aspal, sehingga campuran ini menunjukkan hasil yang lebih baik. Pada penelitian ini hanya mengacu pada kinerja jangka pendek, untuk itu perlunya pengamatan dan penelitian lebih lanjut mengenai kinerja perkerasan jangka panjang hingga akhir umur desain rencana perkerasan. Pada saat ini perkerasan jalan *bio-oil* dengan kandungan minyak nabati sudah digunakan pada IOWA dengan kandungan 5% *bio-oil*, dan juga pengujian langsung pada badan jalan di Hangzhou, Tiongkok dengan kandungan 10% *bio-oil*, secara garis besar penggunaan sudah sesuai dengan standar dan spesifikasi perkerasan jalan, namun untuk kinerja jangka panjang dan penelitian lebih lanjut belum terdapat data yang berkaitan dengan hal tersebut (Su et al., 2018).

4.2.2 Teknologi Aspal Porus

Perkerasan aspal porus ini dapat dikategorikan sebagai jenis perkerasan aspal berkelanjutan, menindaklanjuti dari proses dan jenis material daur ulang yang akan digunakan dalam prosesnya. Bahan agregat yang digunakan dalam campuran aspal porus dapat berupa batu bata ataupun limbah beton (RCA). Diharapkan dengan adanya inovasi teknologi perkerasan aspal porus dapat mengurangi dampak lingkungan dari proses perkerasan jalan dan memberikan manfaat terhadap infiltrasi air, kenyamanan penggunaan perkerasan jalan, pelestarian lingkungan dan juga kekuatan perkerasan jalan jika dibandingkan dengan perkerasan konvensional (De Pascale et al., 2023).

4.2.2.1 Persentase Penggunaan Aspal Porus

Beberapa kajian pustaka berupa skala penelitian laboratorium dan aplikasi perkerasan pada penggunaan teknologi aspal porus, bagian ini **Tabel 4.12** akan memaparkan mengenai persentase penggunaan, dampak yang didapat dari penggunaan teknologi aspal porus pada perkerasan jalan dan penggunaan aspal porus dengan limbah industri yang akan berdampak signifikan pada lingkungan.

Tabel 4. 12 Pengaruh Penggunaan Teknologi Aspal Porus dan Limbah Industri Pada Perkerasan Jalan

Peneliti	Persentase Aspal Porus Pada Limbah Industri	Parameter Uji
(De Pascale et al., 2023)	Campuran 50% agregat dari pembongkaran beton daur ulang	<ul style="list-style-type: none"> • Penurunan CO2 dari fase konstruksi • Penggunaan untuk lalu lintas rendah hingga sedang, untuk dapat mencapai optimal dampak lingkungan
(Xu et al., 2024)	Penggunaan Aspal tua sebanyak 5%, 10%, dan 15% dengan viskositas aspal lebih tinggi	<ul style="list-style-type: none"> • Membutuhkan aspal dengan viskositas lebih tinggi • Tidak berdampak signifikan pada campuran aspal tua • Peningkatan ketahanan retak dan suhu rendah pada aspal
(Muttuvelu & Kjems, 2021)	Bahan <i>sub base course</i> porous dengan porositas sekitar 33% hingga 40%	<ul style="list-style-type: none"> • Peningkatan kadar air lebih dari optimum maka akan mengakibatkan kehilangan daya dukung, dan menyebabkan deformasi permanen

4.2.2.2 Regulasi Penggunaan Aspal Porus

Penggunaan dari aspal porus belum diatur secara detail pada peraturan di Indonesia, namun sebagai acuan penelitian dan pengaplikasian perkerasan aspal porus ada beberapa peraturan yang dapat digunakan sebagai landasan dan batasan dalam pengaplikasian perkerasan jalan. Peraturan yang mengatur secara general perkerasan aspal diatur pada Peraturan Menteri Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat (Permen PUPR) NO. 18/PRT/M/2018 yang berisikan penggunaan aspal buton untuk pembangunan preservasi jalan, dengan mengacu pada peraturan ini memastikan bahwa penggunaan lapis perkerasan aspal

layak secara teknis maupun ekonomi, serta dapat meningkatkan ketahanan jalan sesuai dengan kelayakan uji perkerasan jalan. Berikut SNI 8128:2015 yang mengatur mengenai spesifikasi *stone matrix asphalt* (SMA), standar ini membahas mengenai campuran SMA yang berfungsi pada lapisan aus perkerasan jalan. Selain itu juga ada Spesifikasi Umum 2018 Revisi 1 dari kementerian PUPR mencakup pekerjaan perkerasan jalan, penambahan lebar jalan dan fungsionalitas perkerasan jalan, dengan batasan dan beberapa regulasi terkait aspal ini dapat menjadi acuan dalam penggunaan perkerasan aspal porus.

4.2.2.3 Life Cycle Assessment (LCA) Fase Konstruksi

Tahap dimana terhitung biaya dan dampak lingkungan dari proses produksi bahan perkerasan yang akan digunakan dalam fase konstruksi perkerasan jalan. Biaya terhitung dari proses pengangkutan, bahan yang digunakan, peralatan yang digunakan, dan pengolahan bahan perkerasan aspal. Dampak lingkungan ditinjau dari energi dan emisi gas CO₂ yang ditimbulkan dari tahapan konstruksi. Pada pelaksanaan aspal porus digunakan kandungan pengikat berupa aspal dengan kadar 2% hingga 4,5% yang harus melapisi agregat secara merata setidaknya 90 hingga 95% bagian dari permukaan agregat, sesuai dengan persyaratan dari AASHTO T195. Umumnya digunakan material agregat yang bersudut dan cenderung bergradasi renggang agar terciptanya perkerasan aspal porus. Untuk itu material seperti *recycle concrete aggregate* (RCA), *reclaimed asphalt pavement* (RAP), sirap aspal cocok untuk dijadikan bahan daur ulang pada teknologi perkerasan porus (Zhang & Keavern, 2021).

4.2.2.4 Life Cycle Assessment (LCA) Fase Operasional

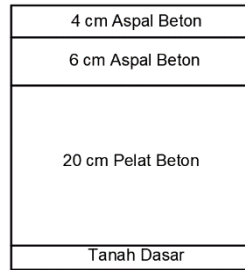
Pada masa operasional disimulasikan dengan studi kasus untuk membandingkan perkerasan aspal porus dengan aspal konvensional, penelitian dibuat dengan desain jenis volume lalu lintas atau *annual average daily traffic* (AADT) dari 2000 AADT, 5000 AADT, dan 10000 AADT dan juga penyesuaian struktur layer perkerasan jalan yang dipengaruhi oleh volume lalu lintas, struktur lapisan perkerasan aspal yang akan dibandingkan pada **Gambar 4.9**.



(a) Aspal Konvensional (AADT 2000)



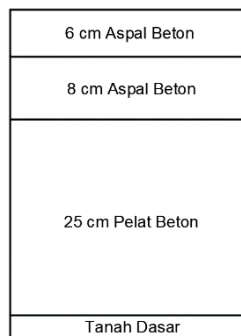
(b) Aspal berpori (AADT 2000)



(c) Aspal konvensional (AADT 5000)



(d) Aspal berpori (AADT 5000)



(e) Aspal konvensional (AADT 10000)



(f) Aspal berpori (AADT 10000)

Gambar 4. 9 Lapisan Struktur Perkerasan Aspal Konvensional Dan Aspal Berpori Dengan Variasi Volume Lalu Lintas

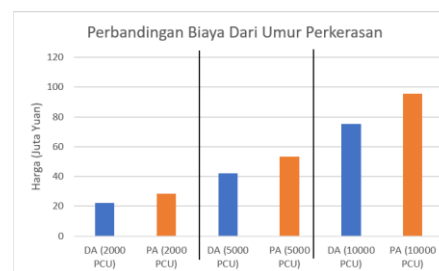
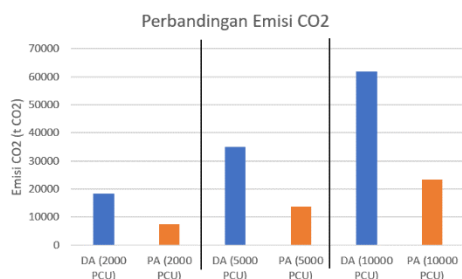
Sumber : Liu, J., Li, H., Wang, Y., & Zhang, H. (2020). Integrated life cycle assessment of permeable pavement: Model development and case study

Hasil dari berbagai sampel percobaan dianalisis terhadap faktor ekonomi, faktor lingkungan pada masing-masing tahapan dari fase persiapan bahan, pengolahan bahan, konstruksi, hingga fase pemeliharaan dan umur akhir rencana. Untuk itu beberapa indeks yang mempengaruhi tolak ukur perkerasan aspal porus yang ada dianalisis berdasarkan pengaruh permeabilitas pada masing-masing sampel, pada bagian ini lapis perkerasan aspal porus diamati terhadap jalan ketika tergenang air. Pengaruh hambatan gelinding (IRI) yang berguna untuk menentukan dampak konsumsi bahan bakar terhadap gesekan permukaan perkerasan jalan, selain itu juga dapat menentukan tolak ukur dalam proses pemeliharaan perkerasan jalan. Pengaruh *albedo* berupa paparan sinar matahari yang dipantulkan oleh permukaan perkerasan jalan. Hasil dari masing-masing secara ekonomi perkerasan aspal porus AADT 2000, 5000, dan 10000 pcu memiliki biaya yang lebih tinggi dibandingkan perkerasan konvensional, dengan perbedaan secara berurutan sebesar 41,35%, 52,76%, dan 58,67% lebih tinggi dari perkerasan

konvensional, hal ini dampak dari proses transportasi material, proses pemeliharaan yang lebih besar dikarenakan umur perkerasan yang lebih pendek. Namun jika dikaitkan dengan dampak lingkungan yang ditimbulkan perkerasan porus memiliki keuntungan terlebih pada masa operasional perkerasan jalan, hal ini dikarenakan konsumsi energi yang lebih kecil dibandingkan perkerasan konvensional, efek toksisitas terhadap manusia yang lebih kecil, dan emisi gas buang baik yang berasal dari proses perkerasan jalan maupun pengguna transportasi yang diuntungkan dengan emisi yang lebih rendah (Liu et al., 2020).

4.2.2.5 Life Cycle Assessment (LCA) Fase Pemeliharaan

Tahap pemeliharaan merupakan suatu tahapan perbaikan ulang perkerasan yang dilakukan reproduksi ulang dengan bahan baku hingga tahapan konstruksi dengan skala kecil untuk bagian tertentu pada perkerasan jalan yang mengalami kerusakan. Pada tahapan ini juga perlu memperhitungkan dampak lingkungan dari produksi material dan konstruksi pemeliharaan, serta dampak ekonomi yang ditimbulkan, sehingga dapat dilakukan pengumpulan data dan evaluasi mengenai efektivitas dari perkerasan aspal porus tersebut. Pada penelitian ini perkerasan aspal porus cenderung menggunakan biaya yang lebih besar dibandingkan perkerasan konvensional, namun secara lingkungan dengan pemeliharaan dan konstruksi awal perkerasan porus dinilai dapat memberikan dampak yang baik, terutama dari sisi emisi gas yang ditimbulkan.



(a) Perbandingan Emisi Gas CO₂

(b) Perbandingan Biaya

Gambar 4.10 Grafik Perbandingan Dampak Lingkungan dan Nilai Ekonomi Dari Perkerasan Aspal Porus dan Aspal Konvensional

Sumber : Liu, J., Li, H., Wang, Y., & Zhang, H. (2020). Integrated life cycle assessment of permeable pavement: Model development and case study

Dari **Gambar 4.10a** didapatkan bahwa perkerasan aspal porus menyumbang emisi gas CO₂ lebih sedikit dibandingkan dengan aspal konvensional, namun pada **Gambar 4.10b** untuk

faktor biaya mengalami kenaikan yang cukup extreme terutama pada fase pemeliharaan, khususnya pada penggunaan lalu lintas yang cukup berat menimbulkan biaya pemeliharaan yang cukup besar juga. Oleh karena itu penggunaan dari porus aspal ini cenderung untuk lalu lintas rendah sehingga tetap dapat memperoleh manfaat yang signifikan (Liu et al., 2020).

4.2.2.6 Life Cycle Assessment (LCA) Fase Umur Akhir Rencana

Umur akhir dari perkerasan jalan aspal porus ini pada hasil penelitian ini selama 36 tahun umur rencana. Umur rencana didefinisikan sebagai rentang desain perkerasan hingga tahap evaluasi untuk dilakukan pembaharuan secara total. Pada penelitian ini dengan dengan lalu lintas yang berat cenderung terus dilakukan perbaikan hingga akhir umur rencana, yang berdampak pada biaya pemeliharaan yang besar. Untuk menjaga struktur porus pada perkerasan aspal porus maka perlunya ditingkatkan viskositas untuk menekan pemeliharaan. Meskipun demikian perkerasan aspal porus lebih signifikan terhadap dampak positif jika dibandingkan dengan beban biaya yang ditimbulkan (Liu et al., 2020 ; Muttuvelu & Kjems, 2021)..

4.3 Rekomendasi Penggunaan Limbah Industri dan Aplikasi Teknologi Pada Limbah Industri

Hasil Penelitian dari pengumpulan data-data dan pembahasan terkait beberapa literatur limbah industri dan teknologi konstruksi jalan hijau. Peneliti membuat **Tabel 4.13** yang berisi mengenai *checklist* jenis material limbah untuk direkomendasikan sebagai jenis perkerasan jalan hijau.

Tabel 4. 13 Hasil Rekap Penelitian Limbah Industri Dan Teknologi Konstruksi Jalan Hijau

No	Kategori	Material Limbah					
		Tailing	Steel Slag	Recycled Asphalt Pavement (RAP)	Limbah Beton Dari Pembongkaran Konstruksi	Limbah Fly Ash dan Bottom Ash	Limbah Serbuk Kayu
1	Persentase Penggunaan Limbah	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
2	Regulasi Penggunaan Limbah	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
3	Life Cycle Assement (LCA) Fase Konstruksi	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
4	Life Cycle Assement (LCA) Fase Operasional	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
5	Life Cycle Assement (LCA) Fase Pemeliharaan	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
6	Life Cycle Assement (LCA) Umur Akhir Rencana	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
7	Penggunaan Teknologi Bio-Oil	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
8	Penggunaan Teknologi Aspal Porus	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

4.3.1 Persentase Penggunaan Limbah

Persentase penggunaan limbah industri ini berkaitan dengan banyaknya limbah yang dapat digunakan untuk menggantikan sebagian maupun keseluruhan dari material alam. Dengan penurunan penggunaan material alam yang ada akan berdampak banyak pada emisi CO₂, energy yang dibutuhkan, dan juga mendukung dalam pelestarian lingkungan dengan tidak mengeksploitasi material alam, yang hal ini tentunya mendukung dalam tercapainya konstruksi jalan hijau. Pada penelitian ini berdasarkan dari sumber data jurnal penelitian penggunaan berbagai limbah industri pada perkerasan jalan menunjukkan setiap persentase penggunaan limbah untuk menggantikan material alam, selain itu juga juga aplikasi pada lapisan perkerasan jalan dengan pemanfaatan limbah industri tersebut untuk mencapai persentase optimal dalam aplikasinya. Sebagai acuan nilai optimal ini berdasarkan sumber penelitian yang membandingkan dengan pengujian laboratorium terhadap setiap standar maupun sampel benda uji dari perkerasan jalan konvensional. Penelitian ini menunjukkan bahwa setiap material limbah industri yang diteliti memiliki persentase optimum dari penggunaan untuk menggantikan material alam.

4.3.2 Regulasi Penggunaan Limbah

Pada bagian ini membahas mengenai regulasi yang berkaitan dengan penggunaan limbah industri pada perkerasan jalan, dan juga teknologi yang akan diaplikasikan pada perkerasan jalan. Disini beberapa limbah industri seperti *tailing*, *steel slag*, *RAP*, dan *fly ash bottom ash* terdapat secara detail mengenai aturan penggunaan limbah yang akan diaplikasikan dalam perkerasan jalan. Dalam regulasi ini membahas lebih detail tentang persentase maksimum yang boleh digunakan, penggunaan limbah dapat dikategorikan sebagai limbah B3 maupun yang berdampak terhadap pencemaran lingkungan. Hal ini bertujuan untuk meningkatkan angka keamanan pada penggunaan limbah industri pada perkerasan jalan, dan juga memberikan batasan aman dalam mencapai kekuatan, durabilitas, dan masa pakai yang optimum pada perkerasan jalan tersebut. Namun jenis limbah seperti limbah beton dan pembongkaran konstruksi, dan serbuk kayu tidak terdapat regulasi secara detail terhadap pemanfaatan jenis limbah tersebut pada perkerasan jalan, untuk itu terdapat beberapa regulasi secara general yang membahas penggunaan limbah sebagai bahan acuan untuk kemudian hari dalam pengaplikasian limbah tersebut.

4.3.3 Life Cycle Assessment (LCA) Fase Konstruksi

Pada fase konstruksi merupakan pengamatan terbaik untuk menentukan persentase penggunaan material limbah industri ini. Penelitian ini menunjukkan material limbah industri yang sudah diaplikasikan pada perkerasan jalan, maupun skala penelitian laboratorium yang memberikan gambaran terhadap fase konstruksi perkerasan jalan. Hasil penelitian yang dirangkum pada **Tabel 4.14** dari beberapa sumber menunjukkan bahwa penggunaan limbah *reclaimed asphalt pavement* (RAP) yang berpotensi terbaik digunakan hampir pada seluruh lapisan perkerasan aspal, dan juga dapat dimodifikasi dengan berbagai teknologi perkerasan jalan, meskipun penggunaan dari RAP dapat melebihi persentase tertulis, namun terdapat regulasi terkait pembatasan penggunaan RAP untuk tetap mempertahankan durabilitas pada perkerasan tersebut. Selain itu penggunaan limbah seperti *tailing*, *steel slag*, *fly ash bottom ash* (FABA), dan serbuk kayu juga berpotensi digunakan untuk lokasi yang berdekatan dengan pengolahan maupun penambangan sehingga dapat meminimalkan limbah yang terbuang, untuk diaplikasikan pada perkerasan jalan. Fase konstruksi ini juga menetapkan desain umur rencana, desain campuran yang pengaruhnya terhadap tahap berikutnya fase perkerasan jalan.

Tabel 4. 14 Aplikasi Jenis Perkerasan Jalan dan Lapisan Struktur Perkerasan Limbah Industri

No	Jenis Material Limbah	Jenis Perkerasan	Aplikasi Limbah	Skala Penelitian	Skala Penerapan	Lokasi Penerapan
1	Limbah Tailing	1. Perkerasan Beton 2. Perkerasan Aspal	1. Lapisan Bawah (Subbase) 2. Lapisan Pondasi (Base Course) 3. Lapis Permukaan (Surface Course)	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	"Million Dollar Highway" Colorado, Amerika Serikat
2	Limbah <i>Steel Slag</i>	1. Perkerasan Aspal	1. Lapisan Bawah (Subbase) 2. Lapisan Pondasi (Base Course)	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
3	Limbah <i>Reclaimed Asphalt Pavement</i> (RAP)	1. Perkerasan Aspal	1. Lapisan Bawah (Subbase) 2. Lapisan Pondasi (Base Course) 3. Lapis Permukaan Antara (Binder Course) 4. Lapis Permukaan (Surface Course)	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	Jalan Raya Antar Negara I-95 Amerika Serikat
4	Limbah Beton dan Pembongkaran Konstruksi	1. Perkerasan Beton 2. Perkerasan Aspal	1. Lapisan Bawah (Subbase) 2. Lapisan Pondasi (Base Course)	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	Phoenix, Miami, Colorado, Duluth
5	Limbah <i>Fly Ash Bottom Ash</i> (FABA)	1. Perkerasan Beton 2. Perkerasan Aspal	1. Lapisan Bawah (Subbase) 2. Lapisan Pondasi (Base Course) 3. Lapis Permukaan (Surface Course)	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
6	Limbah Serbuk Kayu	1. Perkerasan Beton 2. Perkerasan Aspal	1. Lapisan Bawah (Subbase) 2. Lapisan Pondasi (Base Course)	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	

4.3.4 *Life Cycle Assessment (LCA) Fase Operasional*

Fase operasional dari perkerasan jalan ini yang akan berdampak terhadap terjadinya kerusakan pada perkerasan jalan. Beberapa faktor yang dapat mempercepat kerusakan jalan seperti ketidaksesuaian desain rencana penggunaan dengan kendaraan yang akan melewati jalan tersebut, faktor iklim yang akan mempengaruhi perkerasan jalan ini, faktor kekuatan dan mutu dari material yang digunakan juga akan berdampak dan nampak pada saat operasional perkerasan jalan ini. Dari fase operasional ini juga diharapkan perkerasan jalan yang nyaman untuk digunakan bagi pengguna jalan, angka keamanan dari perkerasan jalan, dan terpenting dampak lingkungan seperti tidak menimbulkan dampak buruk terhadap kesehatan manusia. Berdasarkan penelitian ini penggunaan limbah beton dan pembongkaran konstruksi dengan teknologi perkerasan porus merupakan penggunaan pilihan terbaik karena penggunaannya yang tidak menimbulkan dampak lingkungan, dan juga memenuhi aspek kenyamanan dan keamanan pengguna jalan, dengan kombinasi teknologi aspal porus menyebabkan jalan tidak tergenang air, mengurangi kemungkinan kendaraan tergelincir, dan juga dampak lingkungan yang tidak menimbulkan toksisitas. Adapun limbah jenis lainnya seperti *fly ash bottom ash* yang meskipun dikategorikan sebagai limbah non B3 namun dari beberapa sumber penelitian masih dapat berdampak terhadap lingkungan, sehingga masih memerlukan perlakuan khusus untuk meminimalkan dampak dari lingkungan.

4.3.5 *Life Cycle Assessment (LCA) Fase Pemeliharaan*

Untuk tetap mempertahankan performa dari perkerasan jalan yang telah ada, maka diperlukan pemeliharaan perkerasan jalan secara berkala. Pemeliharaan perkerasan jalan ini

berdasarkan dengan desain kondisi permukaan jalan yang memerlukan pemeliharaan, hal ini bertujuan untuk tetap meningkatkan kenyamanan pengguna jalan. Fase pemeliharaan ini cukup berdampak terhadap siklus hidup perkerasan jalan, karena memerlukan pengangkutan material, biaya pemeliharaan, dan material perkerasan untuk pemeliharaan, sehingga dampaknya penurunan nilai dari persentase *life cycle assessment* (LCA) yang ada. Berdasarkan penelitian dari sumber jurnal referensi, transportasi material berdampak terhadap fase pemeliharaan ini, sehingga yang berpotensi lebih baik digunakan untuk pemeliharaan adalah limbah RAP, karena dapat dilakukan pengolahan secara langsung terhadap perkerasan jalan yang mengalami kerusakan.

4.3.6 Life Cycle Assessment (LCA) Fase Umur Akhir Rencana

Umur akhir rencana berkaitan dengan desain pada awal umur rencana terhadap perkerasan jalan tersebut, umumnya pada penelitian mendesain dengan umur rencana perkerasan 20 tahun masa pakai. Setelah itu perkerasan akan dibongkar ataupun dilakukan *overlay* dengan perkerasan baru, disini merupakan keputusan untuk melakukan daur ulang terhadap perkerasan lama maupun menggunakan perkerasan baru, meskipun jenis limbah perkerasan jalan dapat digunakan kembali namun siklus *down cycling*, yaitu penurunan nilai dari perkerasan jalan tersebut sehingga memerlukan inovasi terhadap teknologi maupun pencampuran dengan material lainnya untuk tetap meningkatkan performa pada perkerasan jalan tersebut. Pada penelitian ini dari sumber referensi menunjukkan umur akhir rencana berdasarkan tingkat kerusakan perkerasan jalan untuk menentukan tindakan selanjutnya pada perkerasan jalan tersebut. Penggunaan kembali untuk limbah beton dan pembongkaran konstruksi khususnya untuk perkerasan kaku, dan RAP pada perkerasan lentur menunjukkan potensi terbaik untuk dipertimbangkan digunakan kembali, sehingga tidak diperlukan pengangkutan material untuk melakukan konstruksi yang ada.

4.3.7 Penggunaan Teknologi Bio-Oil Terhadap Limbah Industri

Pada Penggunaan teknologi perkerasan jalan dengan *bio-oil* ini berfungsi sebagai *rejuvenator* untuk jenis material perkerasan tua, maupun perkerasan baru sebagai memperlambat proses oksidasi. Untuk meningkatkan efektivitas penggunaan teknologi terhadap lingkungan sekitar maka digunakan material limbah industri pendukung teknologi *bio-oil* ini, beberapa teknologi itu seperti *reclaimed asphalt pavement* (RAP) yang dicampurkan dengan *bio-oil* diharapkan dapat meningkatkan dan mengembalikan performa aspal tua menjadi

aspal baru kembali, dan juga terdapat limbah *fly ash* dan *bottom ash* yang dapat juga diproses lebih lanjut untuk dicampurkan dengan bio-oil untuk meningkatkan efek penggunaan terhadap lingkungan yang ada

4.3.8 Penggunaan Teknologi Aspal Porus Terhadap Limbah Industri

Penggunaan teknologi aspal porus ini yang dikombinasikan dengan beberapa limbah industri akan berdampak signifikan terhadap penurunan emisi gas CO₂, dampak pencemaran lingkungan, penggunaan energy, dan juga biaya konstruksi awal yang lebih murah daripada menggunakan material alam porus untuk diaplikasi menjadi aspal porus. Untuk itu jenis limbah yang dapat digunakan seperti limbah *steel slag*, *reclaimed asphalt pavement*, limbah beton dan pembongkaran konstruksi, dan *fly ash bottom ash* (FABA), karakteristik material yang dapat diaplikasikan sebagai material pada perkerasan aspal porus adalah memiliki porositas tinggi, memiliki bentuk yang lancip, dan gradasi agregat terbuka sehingga dapat menciptakan perkerasan aspal yang porus. Jenis limbah industri tersebut setidaknya memiliki kategori tersebut sehingga dapat diaplikasi dan digunakan pada aspal porus berdasarkan penelitian dari sumber jurnal-jurnal yang ada.

4.3.9 Potensi dan Hambatan Penggunaan Material Limbah Industri

Pada bagian ini membahas mengenai potensi dan hambatan penggunaan material limbah industri pada konstruksi perkerasan jalan. Potensi penggunaan limbah industri ini berkaitan dengan kemungkinan terbaik penggunaan material limbah industri pada perkerasan jalan dan juga dampak lingkungan yang paling minimum pada perkerasan jalan ini. Dan untuk hambatan penggunaan material limbah industri ini berkaitan dengan batasan penggunaan material limbah dan dampak yang ditimbulkan dari penggunaan limbah industri ini, untuk itu berikut beberapa potensi dan hambatan pada beberapa material limbah industri.

Limbah tailing memiliki potensi digunakan pada perkerasan jalan yang umumnya dekat dengan lokasi pertambangan dan pengolahan limbah tailing, dan umumnya digunakan pada lapisan sub base dan base course pada perkerasan aspal, tapi tidak menutup kemungkinan menjadi campuran pada agregat perkerasan kaku. Namun limbah tailing memiliki hambatan berupa keterbatasan penggunaan yang hanya untuk area yang berdekatan dengan lokasi pertambangan, jika digunakan untuk area lainnya kurang efektif terhadap pengangkutan material, dan juga faktor *toksitas* menjadikan limbah tailing perlu untuk diolah lebih lanjut untuk mengurangi dampak lingkungan pada penggunaannya pada perkerasan jalan.

Limbah *steel slag* memiliki potensi karena karakteristik yang porus maka akan sesuai jika digunakan dengan perkerasan aspal porus. Dapat digunakan untuk mengurangi selip pada perkerasan jalan dan juga dapat diaplikasikan hingga pada lapis permukaan perkerasan jalan. Namun limbah *steel slag* memiliki hambatan berupa persebaran limbah yang terbatas pada area sekitar pabrik pengolahan baja, dan kandungan *toksistas* yang memerlukan penanganan khusus untuk di aplikasikan pada perkerasan jalan.

Limbah *reclaimed asphalt pavement* (RAP), jenis limbah ini merupakan limbah yang memiliki potensi terbaik karena secara umum dapat ditemui pada berbagai daerah, selain itu regulasi dan teknologi perkerasan jalan yang banyak membahas RAP menjadikan potensi terbaik digunakan. Terpenting limbah RAP dapat langsung diproduksi ditempat pembongkaran perkerasan jalan lama sehingga akan memangkas dampak dari transportasi perkerasan jalan. Limbah RAP juga memiliki hambatan berupa perlunya kadar optimal untuk tetap memastikan durabilitas dan performa dari perkerasan jalan tersebut, penggunaan RAP tidak dapat terus digunakan, terdapat batasan maksimum RAP dapat digunakan secara layak pada perkerasan jalan.

Limbah beton dan pembongkaran konstruksi, juga memiliki potensi yang cukup baik digunakan pada perkerasan jalan karena jenis limbah ini cukup sering dijumpai hampir berbagai daerah, fleksibilitas aplikasi pada perkerasan aspal maupun perkerasan beton ini memiliki potensi yang baik. Namun perlunya pemilihan jenis limbah beton dan kadar optimal perkerasan untuk dapat tetap mempertahankan ketahanan serta kekuatan dari perkerasan jalan.

Limbah *fly ash* dan *bottom ash* (FABA), jenis limbah ini pada saat ini cukup banyak digunakan terutama pada perkerasan jalan beton, limbah ini dapat menggantikan agregat campuran beton, sebagai *filler*, maupun sebagai pengganti semen, karena hal ini menjadikan potensi terbaik dari limbah FABA, Selain perkerasan jalan beton, limbah FABA juga dapat dijadikan *rejuvenator* pada perkerasan aspal untuk membantu memulihkan kondisi dari aspal tua. Namun penggunaan limbah FABA juga terbatas untuk area yang berdekatan dengan lokasi pembangkit listrik tenaga batu bara, yang menghasilkan limbah FABA, dan juga limbah jenis ini menurut beberapa sumber mengandung kadar *toksistas*, tetapi menurut regulasi di Indonesia jenis limbah FABA bukan lagi dikategorikan sebagai limbah B3, untuk itu perlunya kajian penelitian mengenai dampak dan bahaya limbah FABA terhadap lingkungan.

Limbah serbuk kayu yang merupakan material yang sering ditemui khususnya di negara Indonesia, karena masih menggunakan bahan dasar kayu pada berbagai peralatan penunjang. Limbah serbuk kayu juga berpotensi digunakan untuk meningkatkan kekuatan tanah dasar

dengan memberikan stabilitas pada tanah dasar, selain itu limbah serbuk kayu juga dapat diolah menjadi rejuvenator untuk meningkatkan viskositas pada aspal tua. Namun limbah serbuk kayu yang terdiri akan material organik ini cenderung akan mengalami penurunan dengan berjalannya waktu, untuk itu perlunya pertimbangan terhadap umur masa pemakaian perkerasan jalan dengan limbah serbuk kayu.