

BAB II TINJAUAN PUSTAKA

Menurut Renstra Kementerian Pekerjaan Umum 2010 – 2014, peningkatan jumlah penduduk menyebabkan kebutuhan infrastruktur jalan meningkat.

Ketersediaan aspal sangat tergantung pada produktifitas minyak bumi karena aspal merupakan produk samping dari penyulingan minyak bumi. Apabila produksi minyak bumi meningkat maka produksi aspal ikut meningkat begitu juga sebaliknya. Kondisi minyak bumi di Indonesia pada saat ini sangat terbatas dan persediaanya semakin menipis (*depleksi*).

Kebijakan pembangunan infrastruktur bidang Pekerjaan Umum yang dilandasi keinginan untuk meningkatkan kualitas lingkungan. Setiap tahapan kegiatan pembangunan infrastruktur jalan harus selalu disertai dengan konsep *pro green* dalam rangka mendukung peningkatan daya dukung lingkungan.

Meningkatnya pembangunan infrastruktur jalan di Indonesia diperlukan pemenuhan material pendukungnya, yang diambil dari alam adalah batu, pasir, semen dan material lainya sesuai yang diperlukan. Permintaan bahan konstruksi telah mendorong berkembangnya usaha penambangan yang telah merusak lingkungan, perubahan tata guna lahan, pencemaran udara serta dibutuhkan biaya besar untuk merehabilitasi lahan bekas penambangan nantinya (Rustam, 2008 dan Hasibuan, 2006).

Hal ini menimbulkan kekhawatiran, karena semakin lama persediaan bahan baku semakin menipis (*depleksi*) sehingga mengakibatkan harga bahan baku semakin mahal dan sulit untuk memperolehnya.

Material bekas bongkaran yang mengandung aspal terkesan dibuang di pinggir jalan dan hanya digunakan untuk menguruk bahu jalan, hal ini sebenarnya tidak efektif dan efisien karena material bekas bongkaran aspal (RAP) dapat digunakan lagi sebagai perkerasan baru (Dinas Bina Marga Prov. Jateng, 2013)

Salah satu alternatif untuk mengurangi penggunaan bahan baku untuk kegiatan konstruksi dilakukan daur ulang limbah dari kegiatan industri/pabrik yang digunakan kembali sebagai material untuk kegiatan sejenis maupun tak sejenis (Nurlina, 2008 dan Yusuf Y., 2006).

Al-Oraimi (2009), meneliti dan menyelidiki tentang sifat-sifat material daur ulang perkerasan aspal (RAP) campuran semen dengan agregat daur ulang dirancang dengan rasio air semen 0,45 sampai 0,50.

Hasil penelitian menjelaskan bahwa campuran semen dan agregat yang dibuat dari material daur ulang perkerasan aspal menghasilkan kuat tekan 33 MPa dan 50 MPa setelah masa perawatan selama 28 hari.

Agrela F., (2012), melakukan penelitian dan mengevaluasi kemungkinan penerapan agregat daur ulang campuran semen untuk *subbase* pada kegiatan pembangunan perkerasan jalan.

Hasil Pelaksanaan campuran agregat bongkaran beton daur ulang layak digunakan dalam pekerjaan jalan dan berdampak terhadap aspek lingkungan.

Okafor F.O., (2010), meneliti sifat mekanik daur ulang perkerasan aspal sebagai agregat dicampur dengan semen. Hasil tes menunjukkan bahwa kekuatan beton yang terbuat dari RAP tergantung pada kekuatan ikatan dari "*mortar asphalt*" (aspal pengikat-pasir sebagai pengisi) pelapisan terhadap agregat tidak dapat menghasilkan

beton dengan kuat tekan di atas 25 MPa. Namun, untuk beton mutu menengah dan rendah, material RAP yang digunakan harus sebanding dengan agregat kerikil alam.

Su K. (2009), mengevaluasi kinerja lapis perkerasan jalan yang mengandung 40% dan 70% material daur ulang perkerasan jalan aspal lama dibandingkan dengan konstruksi jalan yang menggunakan material aspal baru. Hasil ini menunjukkan bahwa aspal daur ulang bisa mencapai sifat yang sama dengan penggunaan aspal baru. Aspal beton daur ulang yang mengandung 40% RAP dapat digunakan sebagai lapis permukaan jalan, dari penelitian menunjukkan kinerja yang sama dari laboratorium dan uji perkerasan hasil eksperimen. Sebaliknya daur ulang mengandung RAP 70% tidak dianjurkan kekuatannya lebih rendah dibanding dengan konstruksi jalan dengan campuran material baru.

Lario R., (2000), meneliti aspek-aspek yang berkaitan dengan pekerjaan konstruksi daur ulang antara lain meneliti capaian tingkat produksi, sifat dari bahan daur ulang, biaya konstruksi, kinerja perkerasan daur ulang. Mesin daur ulang in-situ secara efektif dapat mendaur ulang dengan campuran semen dan menghasilkan kuat tekan rata-rata 14,4 Mpa. Perbandingan campuran aspal 1,5% dan portland semen 1,0% dapat menstabilkan konstruksi CTB. Hasil uji UCS bahan daur ulang antara 1400 kpa sampai dengan 2300 kpa. Hasil uji ITS bahan daur ulang antara 40 kpa sampai dengan 120 kpa. Konstruksi daur ulang memiliki ketangguhan dalam mencegah retak reflektif.

Locander R. (2009), meneliti konstruksi daur ulang perkerasan jalan dengan bahan RAP (*reclaimed asphalt pavement*) mempunyai kekuatan sama dibanding dengan konstruksi yang menggunakan material baru (*virgin material*). RAP merupakan desain alternatif pada pekerjaan konstruksi jalan melalui proses penelitian dan

pendekatan konstruksi sehingga RAP tersebut dapat digunakan di lapangan dan mempunyai kekuatan sesuai dengan standarisasi yang berlaku.

Ditjen Bina Marga Kemen PU. (2012), mengevaluasi penggunaan material bekas perkerasan aspal dan menyimpulkan bahwa salah satu metode dalam pekerjaan lapis perkerasan jalan yang efektif dan efisien adalah daur ulang (*recycling*). Penanganan dengan teknologi daur ulang perkerasan merupakan suatu alternatif untuk mengatasi masalah lingkungan dan memiliki beberapa keuntungan seperti dapat mengembalikan kekuatan perkerasan dan mempertahankan geometrik jalan serta mengatasi ketergantungan akan material baru, mengurangi genangan air daerah sekitar jalan.

Martland G., (2011), menganalisis bahwa setiap kegiatan konstruksi jalan menghasilkan limbah antara 1 sampai 10%, dari limbah tersebut dapat dimanfaatkan lagi sekitar 50 sampai 80%. Metode yang dilakukan menggunakan *Analysis Hierachy Process* (AHP) untuk menentukan alternatif-alternatif penggunaan limbah aspal di Indonesia.

Hasil pengolahan data AHP dijelaskan bahwa nilai prosentase alternatif pertama adalah daur ulang aspal sebesar 43,6%, alternatif ke-2 menggunakan Aspal Buton dengan nilai prosentase 26,7%, alternatif ke-3 menggunakan material baru/alam dengan nilai prosentase 16,4% dan alternatif ke-4 limbah aspal digunakan secara terpisah sebagai bahan kedap air dengan nilai prosentase sebesar 13,3%, hal ini menunjukkan bahwa daur ulang aspal merupakan alternatif terbaik untuk pekerjaan konstruksi jalan di Indonesia.

Guna mewujudkan efisiensi biaya konstruksi jalan maka diperlukan inovasi teknologi untuk mewujudkan konstruksi jalan yang aman, nyaman dan keselamatan bagi pengguna jalan. Salah satu inovasi teknologi konstruksi jalan yaitu dengan cara mendaur ulang kembali material perkerasan jalan melalui kajian yang mendalam.

Dongxing X. (2010), menganalisis dan menyatakan bahwa kekuatan material daur ulang perkerasan jalan tergantung pada berat isi kering. Hasil penelitian tersebut dijelaskan material daur ulang perkerasan jalan membutuhkan air relatif sedikit, kuat tekan dan kuat tarik material campuran daur ulang berbanding eksponensial dengan berat isi keringnya dan berbanding lurus dengan masa perawatannya.

Campuran yang paling efektif untuk pekerjaan konstruksi daur ulang perkerasan jalan dengan perbandingan 65% agregat/ material baru dan 35% menggunakan material daur ulang.

Mc Daniel R. (2002), menganalisis kinerja konstruksi daur ulang perkerasan jalan RAP (*Reclaimed Asphalt Pavement*) dan menyatakan bahwa campuran RAP sampai 50% disarankan digunakan untuk konstruksi jalan di bawah standar Superpave, tetapi gradasi RAP dan kualitas agregat harus baik. Secara umum, peningkatan isi RAP dari campuran meningkatkan kekakuan dan menurunkan regangan geser nya, serta meningkatkan resistensi terhadap deformasi. Penting untuk diperhatikan gradasi agregat RAP dan kualitasnya dalam desain campuran, karena apabila struktur agregat dalam campuran sedikit/kecil dapat mengurangi kekakuan campuran dan akhirnya menurunkan kinerja konstruksi jalan. Untuk menghasilkan Superpave yang kuat dengan material daur ulang lapis perkerasan aspal (RAP) diperlukan metode yang tepat

dalam proses pencampurannya mulai dari pemilihan RAP, meneliti sifat RAP dan susunan gradasinya.

Nono (2009), Mengevaluasi penggunaan lapis pondasi atas dan pondasi bawah dengan campuran semen. Penggunaan lapis pondasi yang distabilisasi dengan semen memiliki nilai koefisien relatif tinggi sehingga meningkatkan nilai stuktur dan mencegah kerusakan lingkungan. Penggunaan material bekas jalan raya dapat menghemat sumber daya alam dan biaya sekitar 20 sampai 40 persen, hemat BBM dan prosesnya lebih cepat 30 sampai 40 persen di banding dengan pekerjaan konstruksi dengan material baru (Filippo G., 2011). Lapisan perkerasan lama digaruk dan diolah sesuai persyaratan tertentu sehingga menjadi konstruksi perkerasan baru yang kuat dan stabil.

Menurut Wirtgen G. (2004), menganalisis material daur ulang perkerasan jalan yang memakai semen mempunyai sifat kaku tetapi kedap air, sedangkan material daur ulang perkerasan jalan yang menggunakan bahan penstabilisasi aspal bersifat lentur tetapi tidak kedap air. Untuk material daur ulang perkerasan jalan yang sudah mengandung aspal (RAP) apabila distabilisasi dengan semen akan menghasilkan lapis perkerasan yang mempunyai sifat semi lentur.

Ohio, 2005 meneliti material yang digunakan pada konstruksi *Cement Treated Recycling Base* (CTRB) terdiri dari material garukan perkerasan lama, agregat baru, semen portland, air. Konstruksi daur ulang /CTRB ini menghasilkan material padat yang digunakan sebagai pondasi atas (*base*) dan bentuknya mirip seperti beton (*soil concrete*) tetapi bersifat lentur karena di dalamnya mengandung aspal, sehingga sering disebut konstruksi *semi rigid pavement*. Penggunaan RAP dari 14%; 20%; 28% sampai

40% dapat dilakukan untuk lapis daur ulang perkerasan jalan, menggunakan RAP adalah cara untuk mengurangi biaya penggunaan aspal baru.

Puslitbang Prasarana Transportasi (2002), meneliti besarnya Nilai Kuat Tekan Bebas (KTB) campuran dengan proporsi campuran 60% bahan garukan dan 40% agregat baru dan kadar semen 6% untuk umur 7 hari belum mencapai nilai KTB yang dipersyaratkan oleh spesifikasi SNI 03-3438-1994 (tanah semen). Makin besar prosentase penambahan agregat baru nilai KTB dan CBR makin tinggi dan kenaikan nilai KTB dengan penambahan agregat baru sekitar 40%.

Menurut Pradani (2012), meneliti material bekas perkerasan jalan dapat digunakan kembali sebagai agregat konstruksi perkerasan baru. Lapisan perkerasan lama digaruk dan diolah sesuai persyaratan tertentu sehingga menjadi konstruksi perkerasan baru yang kuat dan stabil.

Material perkerasan lama dapat digunakan kembali karena masih mempunyai daya tahan gradasi cukup baik walaupun telah mengalami penurunan kualitas tetapi dapat diperbaiki dengan melakukan rekayasa laboratorium.

Penambahan elevasi menimbulkan masalah pada fasilitas pelengkap seperti rambu-rambu, median, bahu jalan dan lingkungan setempat. Salah satu cara untuk mempertahankan elevasi jalan adalah dengan mengupas terlebih dahulu lapisan permukaan perkerasan lama dengan cara Cold Milling. Hasil kupasan tersebut dikenal dengan istilah Reclaimed Asphalt Pavement (RAP). Volume material garukan bekas perkerasan jalan cukup besar sehingga perlu dianalisis dan material bekas perkerasan jalandapat digunakan kembali menjadi lapis perkerasan baru. Metode daur ulang perkerasan jalan dapat mengurangi pemanfaatan material baru.

Hasil pengujian kuat tekan terhadap benda uji CTRB campuran dengan modifikasi 67% RAP + 33% sirtu kelas A didapat kuat tekan rata-rata paling tinggi untuk teknik curing semprot sebesar 105,1kgf/cm² dari persyaratan minimal 78kgf/cm². Dari hasil analisis biaya, lapis perkerasan *base course* yang menggunakan material daur ulang sangat direkomendasikan, campuran daur ulang untuk lapis perkerasan *base course* dapat menjadi alternatif pengganti base course konvensional sehingga menghemat biaya pekerjaan konstruksi dan dapat menjadi alternatif lain sebelum digunakan lapis perkerasan kaku/*Rigid Pavement* (Pradnyana, 2012).

Material RAP dapat digunakan sebagai agregat pada konstruksi perkerasan melalui penelitian mekanistik di laboratorium dengan mengkonversi kekuatan struktur perkerasan jalan raya diaplikasikan di lapangan dapat juga digunakan pada perkerasan bandara. Penelitian mekanistik tergantung pada struktur perkerasan, sifat material, suhu analisis, dan beban yang diterapkan sehingga setiap lokasi landasan yang berbeda diperlukan penelitian yang sama dan dimungkinkan mendapatkan hasil penelitian yang berbeda (Hajj, 2008).

2.1. Jalan

Sesuai dengan Undang-Undang Republik Indonesia No. 38 Tahun 2004 Tentang Jalan pasal 1 ayat (4) disebutkan definisi jalan, adalah prasarana transportasi darat yang meliputi segala bagian jalan, termasuk bangunan pelengkap dan perlengkapannya yang diperuntukkan bagi lalu lintas, yang berada pada permukaan tanah dan atau air, serta di atas permukaan air, kecuali jalan kereta api, jalan lori, dan jalan kabel. Di dalam undang-undang tersebut dijelaskan juga

beberapa definisi lain, yaitu ayat (5) Jalan umum adalah jalan yang diperuntukkan bagi lalu lintas umum; ayat (6) Jalan khusus adalah jalan yang dibangun oleh instansi, badan usaha, perseorangan, atau kelompok masyarakat untuk kepentingan sendiri; serta ayat (7) Jalan Tol adalah jalan umum yang merupakan bagian system jaringan jalan dan sebagai jalan nasional yang penggunanya diwajibkan membayar tol. Dalam pasal (5) Undang-undang No. 38 tahun 2004 diterangkan pula peran sebuah jalan, yaitu ayat (1) Jalan sebagai bagian prasarana transportasi mempunyai peran penting dalam bidang ekonomi, sosial budaya, lingkungan hidup, politik, pertahanan dan keamanan, serta dipergunakan untuk sebesar-besarnya kemakmuran rakyat; ayat (2) Jalan sebagai distribusi barang dan jasa merupakan urat nadi kehidupan masyarakat, bangsa dan negara; ayat (3) Jalan yang merupakan satu kesatuan sistem jaringan jalan menghubungkan dan mengikat seluruh wilayah republik Indonesia.

2.1.1. Konstruksi Perkerasan Jalan

Menurut Sukirman (1999), konstruksi perkerasan jalan yang telah digunakan pada saat ini terdiri dari : (i) Konstruksi perkerasan lentur (*flexible pavement*), yaitu konstruksi perkerasan jalan dengan bahan perekat aspal. Tiap lapisan perkerasan memikul dan menyebarkan beban lalu lintas ke tanah dasar. (ii) Konstruksi perkerasan kaku (*rigid pavement*), yaitu perkerasan yang menggunakan semen (*portland cement*) sebagai bahan pengikat. Plat beton dengan atau tanpa tulangan diletakkan di atas tanah dasar dengan atau tanpa lapis pondasi bawah. Beban lalu lintas sebagian besar dipikul oleh plat beton. (iii) Konstruksi perkerasan komposit (*composite pavement*), yaitu perkerasan

kaku yang dikombinasikan dengan perkerasan lentur dapat berupa perkerasan lentur di atas perkerasan kaku, atau perkerasan kaku di atas perkerasan lentur. Konstruksi perkerasan komposit digunakan pada plat jembatan, area parkir pada bangunan bisnis seperti hotel, super market dan untuk rehabilitasi perkerasan beton yang telah mengalami kerusakan pada permukaannya.

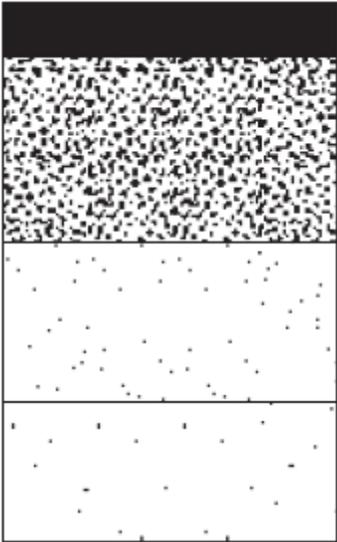
2.1.2. Lapis Pondasi Jalan

Lapisan pondasi jalan adalah lapis perkerasan yang terletak dibawah lapis permukaan. Lapisan ini harus mampu memikul beban roda lalu lintas dan menyalurkan gaya ke tanah dasar . Susunan lapis pondasi terdiri dari lapis pondasi atas (*base course*) dan lapis pondasi bawah (*sub base course*).

Fungsi Lapis Pondasi antara lain : (i) Sebagai perletakan atau lantai kerja terhadap lapis permukaan. (ii) Sebagai lapisan perkerasan yang menahan gaya lintang dari beban roda dan menyebarkan beban ke lapisan di bawahnya. (iii) Sebagai lapis peresapan agar air konstruksi jalan tidak jenuh air. (iv) Mencegah butiran tanah dasar masuk ke lapisan pondasi atas.

Jenis-jenisnya lapis pondasi adalah Lapis Pondasi Agregat Kelas A, Lapis Pondasi Agregat Kelas B dan kelas C, lapis pondasi yang distabilisasi terdiri dari *Asphal Treated Base (ATB)*, *Cement Treated Base (CTB)*, *Cement Treated Recycling Base (CTRB)*.

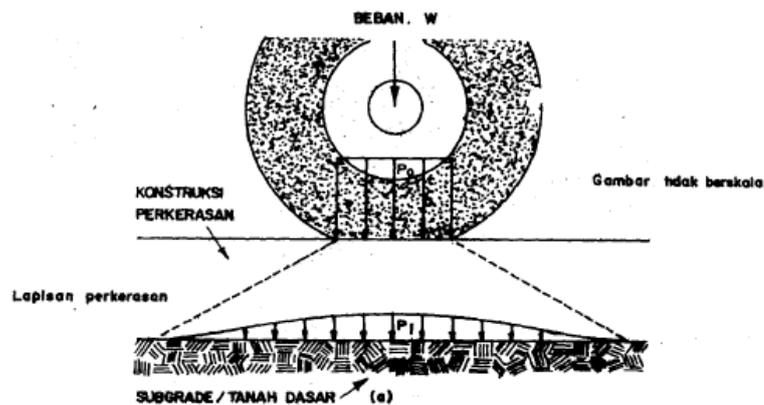
Jenis perkerasan yang umum dipergunakan di Indonesia adalah perkerasan lentur seperti ditunjukkan gambar di bawah ini.

Tipe lapis perkerasan lentur	Bagian lapis perkerasan	Konstruksi dibuat dari
	Lapis permukaan (Surface)	Aspal/seal
	Lapis pondasi atas (Base course)	Stabilisasi aspal/ semen/material butiran
	Lapis pondasi bawah (Subbase course)	Stabilisasi aspal/ semen/material butiran
	Lapis tanah dasar (Subgrade)	Stabilisasi semen/ material butiran/in-situ material

Gambar 2.1. Tipe lapis perkerasan lentur (*flexible pavement*)

Sumber : Wirtgen, 2010.

Proses penyaluran beban lalu lintas yang terjadi pada konstruksi jalan secara teoritis dapat dilihat pada gambar di bawah ini.



Gambar 2.2. Penyebaran beban roda melalui perkerasan jalan

Sumber : Sukirman, 1999.

Beban yang bekerja pada konstruksi perkerasan jalan terdiri dari gaya vertikal berasal dari muatan kendaraan, gaya horisontal dari rem dan gaya getar

dari pukulan roda kendaraan. Karena sifat penyebaran gaya-gaya yang terjadi pada konstruksi perkerasan jalan maka beban yang diterima masing-masing lapis perkerasan berbeda, semakin ke bawah beban yang diterima semakin kecil. Lapis permukaan harus mampu menerima seluruh jenis gaya dari beban kendaraan, lapis pondasi atas menerima gaya horisontal dan vertikal serta lapisan tanah dasar dianggap menerima gaya vertikal saja.

Berdasarkan hal tersebut maka masing-masing lapis perkerasan jalan mempunyai perbedaan persyaratan yang harus dipenuhi guna mewujudkan konstruksi perkerasan jalan yang kuat dan kokoh (Sukirman, 1999).

Herliansyah (2012), menyatakan perkerasan lentur dengan bahan pengikat aspal yang sering disebut campuran aspal panas atau hotmix. Pemakaian tipe perkerasan lentur tersebut semakin meningkat seiring dengan meningkatnya pengembangan suatu daerah. Untuk memenuhi kebutuhan tersebut sering dilakukan impor dari luar negeri seperti aspal Shell, ESSO 2000 dan sebagainya. Komponen aspal memberikan sumbangan sebesar 60% dari biaya total *hot mix*.

Susunan lapis perkerasan jalan secara umum terdiri atas :

1. Lapisan tanah dasar (*Subgrade*)

Lapisan tanah dasar adalah lapisan tanah yang berfungsi sebagai tempat perletakan lapis perkerasan dan mendukung konstruksi perkerasan jalan di atasnya. Menurut spesifikasi, tanah dasar adalah lapisan paling atas dari timbunan badan jalan setebal 30 cm, yang mempunyai persyaratan tertentu sesuai fungsinya, yaitu yang berkenaan dengan kepadatan dan daya

dukungnya (CBR). Lapisan tanah dasar dapat berupa tanah asli yang dipadatkan jika tanah aslinya baik, atau tanah urugan yang didatangkan dari tempat lain atau tanah yang distabilisasi dan lain lain.

Ditinjau dari muka tanah asli, maka lapisan tanah dasar dibedakan atas :

(i) Lapisan tanah dasar, tanah galian; (ii) Lapisan tanah dasar, tanah urugan; (iii) Lapisan tanah dasar, tanah asli.

Kekuatan dan keawetan konstruksi perkerasan jalan sangat tergantung dari sifat-sifat dan daya dukung tanah dasar. Umumnya persoalan yang menyangkut tanah dasar adalah sebagai berikut :

(i) Perubahan bentuk tetap (deformasi permanen) akibat beban lalu lintas;
(ii) Sifat mengembang dan menyusutnya tanah akibat perubahan kadar air;
(iii) Daya dukung tanah yang tidak merata akibat adanya perbedaan sifat-sifat tanah pada lokasi yang berdekatan atau akibat kesalahan pelaksanaan misalnya kepadatan yang kurang baik.

2. Lapisan Pondasi Bawah (*Subbase Course*)

Lapis pondasi bawah adalah lapisan perkerasan yang terletak di atas lapisan tanah dasar dan di bawah lapis pondasi atas.

Lapis pondasi bawah ini berfungsi sebagai : (i) Bagian dari konstruksi perkerasan untuk menyebarkan beban roda ke tanah dasar; (ii) Lapis peresapan, agar air tanah tidak berkumpul di pondasi; (iii) Lapisan untuk mencegah partikel-partikel halus dari tanah dasar naik ke lapis pondasi atas; (iv) Lapis pelindung lapisan tanah dasar dari beban roda-roda alat berat (akibat lemahnya daya dukung tanah dasar) pada awal-awal pelaksanaan

pekerjaan; (v) Lapis pelindung lapisan tanah dasar dari pengaruh cuaca terutama hujan.

3. Lapisan pondasi atas (*base course*)

Lapisan pondasi atas adalah lapisan perkerasan yang terletak di antara lapis pondasi bawah dan lapis permukaan.

Lapisan pondasi atas ini berfungsi sebagai : (i) Bagian perkerasan yang menahan gaya lintang dari beban roda dan menyebarkan beban ke lapisan di bawahnya; (ii) Bantalan terhadap lapisan permukaan.

Bahan-bahan untuk lapis pondasi atas ini harus cukup kuat dan awet sehingga dapat menahan beban-beban roda.

Dalam penentuan bahan lapis pondasi ini perlu dipertimbangkan beberapa hal antara lain, kecukupan bahan setempat, harga, volume pekerjaan dan jarak angkut bahan ke lapangan.

4. Lapisan Permukaan (*Surface Course*)

Lapisan permukaan adalah lapisan yang bersentuhan langsung dengan beban roda kendaraan. Lapisan permukaan ini berfungsi sebagai : (i) Lapisan yang langsung menahan akibat beban roda kendaraan; (ii) Lapisan yang langsung menahan gesekan akibat rem kendaraan (lapisaus); (iii) Lapisan yang mencegah air hujan yang jatuh di atasnya tidak meresap ke lapisan bawahnya dan melemahkan lapisan tersebut; (iv) Lapisan yang menyebarkan beban ke lapisan bawah, sehingga dapat dipikul oleh lapisan di bawahnya.

Apabila diperlukan, dapat juga dipasang suatu lapis penutup / lapis aus (*wearing course*) di atas lapis permukaan tersebut. Fungsi lapis aus ini adalah sebagai lapisan pelindung bagi lapis permukaan untuk mencegah masuknya air dan untuk memberikan kekesatan (*skid resistance*) permukaan jalan. Lapis aus tidak diperhitungkan ikut memikul beban lalu lintas.

Tabel 2.1. Keuntungan, Kerugian *Flexible Pavement* dan *Rigid Pavement*

<i>Flexible Pavement</i>	
Kelebihan	<ol style="list-style-type: none"> 1. Dapat digunakan untuk semua tingkat volume lalu lintas. 2. Kerusakan tidak merambat ke bagian konstruksi yang lain, kecuali jika perkerasan terendam air. 3. Pada umumnya biaya awal konstruksi rendah, terutama untuk jalan local dengan volume lalu lintas rendah. 4. Pelapisan ulang dapat dilaksanakan pada semua tingkat ketebalan perkerasan yang diperlukan, dan lebih mudah menentukan perkiraan pelapisan ulang. 5. Tebal konstruksi perkerasan lentur adalah tebal seluruh lapisan yang ada diatas tanah dasar. 6. Bila dibebani melentur. Beban hilang, lenturan kembali. 7. Jalan aspal lebih halus, mulus, dan tidak bergelombang sehingga enak dalam berkendara. 8. Warna hitam aspal mempengaruhi psikologi pengendara menjadi lebih teduh dan nyaman. 9. Untuk penggunaan pada jalan dengan lalu lintas kendaraan ringan, jalan aspal lebih murah dibanding konstruksi jalan beton. 10. Proses perawatan lebih mudah.
Kekurangan	<ol style="list-style-type: none"> 1. Kendali kualitas untuk job mix lebih rumit. 2. Sulit bertahan terhadap kondisi drainase yang buruk.

-
3. Umur rencana relative pendek 5 – 10 tahun.
 4. Indeks pelayanan yang terbaik hanya pada saat selesai pelaksanaan konstruksi, setelah itu berkurang seiring dengan waktu dan frekuensi beban lalu lintasnya.
 5. Biaya pemeliharaan yang dikeluarkan, mencapai lebih kurang dua kali lebih besar dari pada perkerasan kaku.
 6. Kekuatan konstruksi perkerasan lentur ditentukan oleh tebal setiap lapisan dan daya dukung tanah dasar.
 7. Tidak tahan terhadap genangan air, sehingga memerlukan saluran drainase yang baik untuk proses pengeringan jalan aspal pasca hujan atau banjir;
 8. Pada struktur tanah yang buruk harus dilakukan perbaikan tanah terlebih dahulu sebelum ditumpangi oleh konstruksi jalan aspal.
-

Rigid Pavement

- | | |
|------------|---|
| Kelebihan | <ol style="list-style-type: none"> 1. Job mix lebih mudah dikendalikan kualitasnya. Modulus Elastisitas antara lapis permukaan dan pondasi sangat berbeda. 2. Dapat lebih bertahan terhadap kondisi drainase yang lebih buruk. 3. Umur rencana dapat mencapai 20 tahun. 4. Indeks pelayanan tetap baik hampir selama umur rencana, terutama jika <i>transverse joint</i> dikerjakan dan dipelihara dengan baik. 5. Biaya pemeliharaan relatif tidak ada. 6. Kekuatan konstruksi perkerasan kaku lebih ditentukan oleh kekuatan pelat beton sendiri (tanah dasar tidak begitu menentukan). |
| Kekurangan | <ol style="list-style-type: none"> 1. Kebanyakan digunakan hanya pada jalan kelas tinggi, serta pada perkerasan lapangan terbang. |
-

-
2. Jika terjadi kerusakan maka kerusakan tersebut cepat dan dalam waktu singkat.
 3. Pada umumnya biaya awal konstruksi tinggi. Tetapi biaya awal hampir sama untuk jenis konstruksi jalan berkualitas tinggi dan tidak tertutup kemungkinan bias lebih rendah.
 4. Agak sulit untuk menetapkan saat yang tepat untuk melakukan pelapisan ulang.
 5. Tebal konstruksi perkerasan kaku adalah tebal pelat beton tidak termasuk pondasi.
 6. Bila dibebani praktis tidak melentur/kecil.
-

Sumber : Wiyanti, 2011 dan Herliansyah, 2012.

2.1.3. Bagian-Bagian Jalan

Sesuai dengan acuan standar Tata Cara Perencanaan Geometrik Jalan Antar Kota, Dirjen Bina Marga 1997 maka bagian-bagian jalan dapat dijelaskan di bawah ini :

1. Jalur Lalu Lintas

Jalur lalu lintas adalah bagian jalan yang dipergunakan untuk lalu lintas kendaraan yang secara fisik berupa perkerasan jalan . Batas jalur lalu lintas dapat berupa : median, bahu, trotoar, pulau jalan dan separator.

Jalur lalu lintas dapat terdiri dari : (i) 1 jalur-2 lajur-2 arah; (ii) 1 jalur-2 lajur-1 arah; (iii) 2 jalur- 4 lajur- 2 arah; (iv) 2 jalur-n lajur - 2 arah.

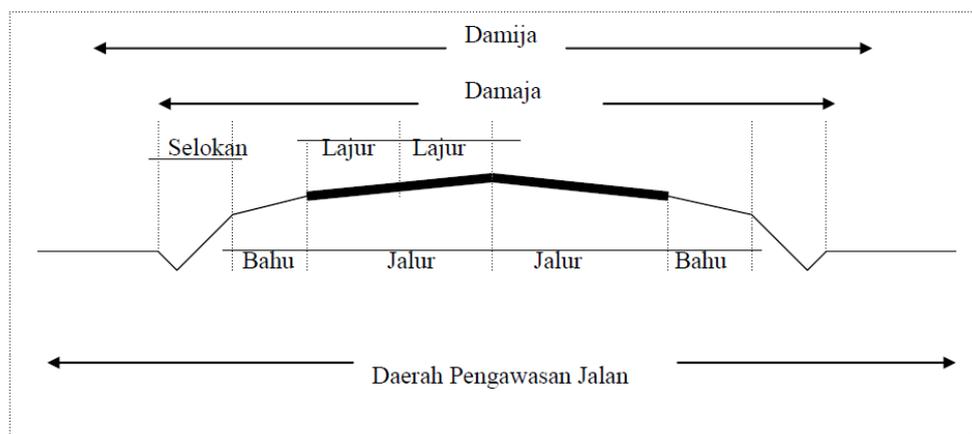
2. Lajur

Lajur adalah bagian jalur lalu lintas yang memanjang, dibatasi oleh marka lajur jalan, memiliki lebar yang cukup untuk dilewati suatu kendaraan

bermotor sesuai kendaraan rencana. Untuk kelancaran drainase permukaan, lajur lalu lintas pada alinemen lurus : 2-3% untuk perkerasan aspal dan perkerasan beton dan 4-5% untuk perkerasan kerikil.

3. Median

Median adalah bagian bangunan jalan yang secara fisik memisahkan dua jalur lalu lintas yang berlawanan arah. Fungsi median adalah : (i) Memisahkan 2 aliran lalu lintas yang berlawanan arah; (ii) Ruang lapak tunggu penyebarang jalan; (iii) Penempatan fasilitas jalan; (iv) Tempat prasarana kerja sementara; (v) Penghijauan; (vi) Tempat berhenti darurat; (vii) Cadangan lajur; (viii) Mengurangi silau dari sinar lampu kendaraan dari arah yang berlawanan.



Gambar 2.3. Penampang melintang jalan

Sumber : Dirjen Bina Marga 1997.

Daerah Milik Jalan (Damija) dibatasi oleh lebar yang sama dengan Daerah Manfaat Jalan (Damaja) ditambah ambang pengaman konstruksi jalan dengan tinggi 5 meter dan kedalaman 1,5 meter.

2.1.4. Kerusakan Bangunan Jalan

Kerusakan bangunan jalan dan jembatan adalah suatu keadaan yang menunjukkan bahwa struktur bangunan jalan dan jembatan telah mengalami penurunan kualitas sehingga konstruksi tersebut tidak mampu melayani pengguna jalan dengan kecepatan secara nyaman dan aman, (Rosliansjah, 2000).

Menurut Manual Pemeliharaan Jalan Nomor : 03/MN/B/1983 yang dikeluarkan oleh Direktorat Jendral Bina Marga, kerusakan jalan terbagi atas :

1. Retak (*Cracking*)

Retak yang terjadi pada lapisan permukaan jalan terdiri atas retak halus (*hair cracking*), lebar celah kecil atau sama dengan 3 mm.

Penyebabnya adalah bahan perkerasan yang kurang baik, tanah dasar atau bagian perkerasan di bawah lapis permukaan kurang stabil. Retak halus ini dapat meresapkan air ke dalam lapis permukaan. Untuk pemeliharaan dapat dipergunakan lapis latasir atau buras. Dalam tahap perbaikan sebaiknya dilengkapi dengan perbaikan sistem drainase. Retak rambut dapat berkembang menjadi retak buaya.

1) Retak Kulit Buaya (*alligator crack*)

Jenis kerusakan konstruksi jalan retak kulit buaya mempunyai bentuk dan sifat antara lain: (i) Lebar celah > 3 mm; (ii) Saling berangkai membentuk serangkaian kotak-kotak kecil yang menyerupai kulit buaya; (iii) Dengan bentuk celah retak yang cukup lebar maka akan memudahkan air masuk meresap kedalam perkerasan; (iv) Makin lama

kalau dibiarkan maka akan menjadi lubang karena diakibatkan pelepasan butir-butir.

Penyebab kerusakkan jalan berbentuk kulit buaya adalah : (i) Bahan perkerasan yang digunakan kurang baik; (ii) Pelapukan permukaan yang diakibatkan umur perkerasan sudah melewati umur rencana atau transportasi yang memakainya cukup tinggi dan dengan muatan yang berlebihan maka akan memperpendek dari umur rencana; (iii) Air tanah khususnya Jalan Lingkar Utara Semarang yang berdampingan dengan laut maka tidak menutup kemungkinan tercemar dan kemasukan air laut sehingga perkerasan menjadi mudah untuk terkelupas; (iv) Dibawah lapis permukaan kurang stabil.

Cara penanganannya adalah : (i) Penambalan setempat (*patching*); (ii) Perbaikan drainase; (iii) Retak Kulit Buaya yang cukup panjang dan lebar dapat dilakukan penggalian menggunakan alat *Cold Milling* dan diolah kemudian digelar kembali.

Retak kulit buaya dapat dilihat pada gambar di bawah ini.

2. Ambles (*Depressions*)

Penyebab ambles konstruksi perkerasan jalan adalah beban kendaraan yang melebihi beban rencana, pelaksanaan kurang baik, atau penurunan bagian perkerasan karena tanah dasar mengalami penurunan (*settlement*).

Kerusakan ambles pada konstruksi perkerasan jalan mempunyai bentuk dan sifat antara lain: (i) Kerusakan terjadi setempat dengan tanpa retak; (ii) Kedalaman umumnya lebih dari 2 cm; (iii) Akan menampung air dan atau

meresapkan air; (iv) Dapat membahayakan pemakai jalan; (v) Semakin lama berkembang menjadi lubang.

Secara rinci penyebab kerusakan jalan menjadi ambes adalah: (i) Beban berat kendaraan yang lewat berlebihan; (ii) Pelaksanaan yang kurang baik terutama pada saat pemadatan; (iii) Penurunan dibagian perkerasan di karenakan tanah dasar kurang baik.

Beberapa cara penanganan kerusakan ambles pada konstruksi perkerasan jalan adalah: (i) Untuk ambles yang kurang dari 5 cm dapat diperbaiki dengan *levelling*; (ii) Untuk ambles lebih besar dari 5 cm bisa ditangani menggunakan tambalan/*patching* dan galian harus sampai pada bagian yang paling keras.

3. Alur (*Rutting*)

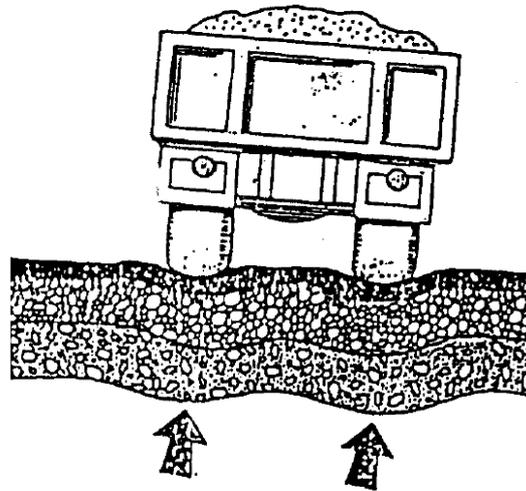
Terjadi pada lintasan roda sejajar dengan as jalan. Terjadinya alur disebabkan oleh lapis perkerasan yang kurang padat. Dengan demikian terjadi penambahan pemadatan akibat repetisi beban lalu lintas pada lintasan roda.

Kerusakan alur konstruksi perkerasan jalan bentuk dan sifatnya yaitu: (i) Berbentuk alur memanjang atau parit yang sejajar as jalan dan terjadi pada lintasan roda; (ii) Dapat menampung air; (iii) Mengurangi kenyamanan bagi pengguna jalan; (iv) Membahayakan pemakai jalan khususnya kendaraan roda dua akan mudah terperosok yang disebabkan oleh kerusakan alur; (v) bila dibiarkan semakin lama menjadi retak dan menjadi lubang.

Penyebab kerusakan alur pada konstruksi jalan adalah : (i) Lapis permukaan yang kurang padat atau posisi roda kendaraan jadi satu tanpa pindah-pindah; (ii) Stabilisasi rendah sehingga terjadi deformasi plastis; (iii) Kerusakan Alur biasanya terjadi pada bagian tanjakan atau sebaliknya yaitu turunan, dan juga jalan dekat lampu merah dikarenakan semua itu terjadi karena roda kendaraan menetap jadi satu ditambah pengereman.

Cara penanganannya dipotong dibagian jalan yang mengalami kerusakan alur dengan alat *Cold Milling* kemudian dilapis kembali dengan perkerasan yang telah disesuaikan.

Kerusakan jalan berbentuk alur dapat dilihat pada gambar di bawah ini.



Gambar 2.4. Kerusakan alur pada perkerasan jalan
Sumber : Dirjen Bina Marga 1992.

4. Keriting (*Corrugations*)

Alur yang terjadi melintang jalan, dengan timbulnya lapisan permukaan yang berkeriting. Penyebab kerusakan ini adalah rendahnya stabilitas campuran yang dapat berasal dari terlalu tingginya kadar aspal, terlalu

banyak menggunakan agregat halus, agregat berbentuk bulat. Keriting dapat juga terjadi jika lalu lintas dibuka sebelum perkerasan mantap.

Kerusakan keriting (*corrugations*) konstruksi perkerasan jalan bentuk-bentuk dan sifatnya yaitu: (i) Keriting dengan arah melintang; (ii) Keriting dengan arah sejajar dengan as jalan, biasanya kerusakan semacam ini sering terjadi di daerah - daerah tanjaan atau turunan khususnya pada musim panas yang tinggi akan lebih cepat timbulnya kerusakan jalan keriting.

Penyebab kerusakan keriting pada konstruksi perkerasan jalan yaitu: (i) Stabilitas rendah; (ii) Lalulintas dibuka sebelum perkerasan mantap.

Penanganannya memotong pada bagian yang keriting dengan alat *Cold Milling* kemudian dilapisi kembali atau penutupan dengan lapis perkerasan yang sesuai.

5. Jembul (*Upheavel*)

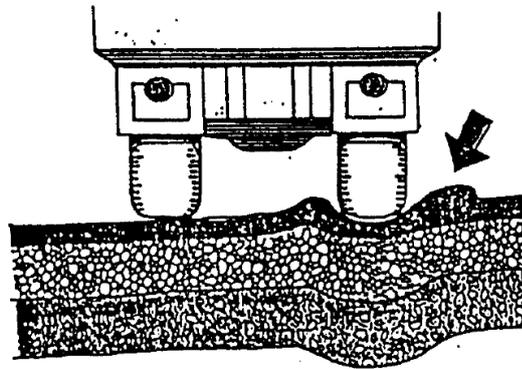
Hal ini terjadi akibat adanya pengembangan tanah dasar (*subgrade*) pada tanah ekspansif.

Kerusakan Jembul pada konstruksi perkerasan jalan sifat dan bentuknya adalah: (i) Biasanya terjadi setempat tanpa ada retak; (ii) Akan menghambat pengaliran air atau meresapkan air; (iii) Membahayakan pemakai jalan; (iv) Mengurangi kenyamanan.

Penyebab kerusakan ini adalah: Pengembangan tanah dasar pada perkerasan di atas tanah dasar yang ekspansif.

Penanganannya dipotong dengan alat *Cold Milling* dan dilapisi kembali yang sesuai atau juga digali dengan kedalaman tertentu dengan menggunakan

metode *Recycling* (Daur Ulang) akan lebih hemat karena tanpa harus mendatangkan material baru dan elevasi jalan tetap tidak berubah tingkat kesulitan dalam pelaksanaan akan lebih kecil karena dengan menggunakan alat sistem daur ulang (*Recycling*) akan lebih cepat.



Gambar 2.5. Kerusakan jembul pada perkerasan jalan
Sumber : Dirjen Bina Marga 1992.

2.2. Kriteria Material Konstruksi Pengerasan Jalan

2.2.1. Aspal

Aspal telah digunakan manusia untuk memenuhi kebutuhan hidupnya sejak 300 tahun sebelum masehi. Asphalt atau bitumen sudah digunakan untuk keperluan antara lain : (i) Sebagai perekat tembok oleh bangsa Babilonia, (ii) Sebagai perekat pada pekerjaan pemasangan lantai oleh Kerajaan Romawi, (iii) Sebagai pengawet jenazah oleh bangsa Mesir, (iv) Tahun 1802 bangsa Perancis mulai menggunakan aspal sebagai lapis lantai jembatan, dan mulai tahun 1838 sampai dengan sekarang aspal telah digunakan sebagai bagian dari material konstruksi jalan.

Aspal terbentuk dari beberapa susunan kimia yaitu senyawa Hydrogen (H) dan Carbon (C) dan terdiri dari parafins, neptene, dan aromatik. Bahan-bahan ini dapat dikelompokkan menjadi beberapa kelompok yaitu : (i) Asphaltene berbentuk butiran halus berdasarkan *aromatic benzene structure* mempunyai berat molekul tinggi; (ii) Oils berbentuk cairan yang melarutkan *asphaltene* tersusun dari parafins, *cyclo paraffins* dan aromatik serta mempunyai berat molekul rendah; (iii) Resin berbentuk cairan yang menyelimuti *asphaltene* dan mempunyai berat molekul sedang. Campuran atau gabungan *oil* dan *resin* disebut *maltenese*.

Aspal yang beredar di pasaran dan digunakan dalam konstruksi jalan mempunyai beberapa jenis. Jenis-jenis aspal dapat disebutkan sebagai berikut : (i) Lake asphalt dengan komposisi bahan 40% bitumen, 30% eteris, 25% mineral, 5% organik. Aspal ini banyak di Trinidad Bermuda; (ii) Batu aspal (*rock asphalt*), dikenal dengan sebutan Asbuton (aspal batu buton) terdapat di Sulawesi Tenggara. Aspal ini berada didalam batu gamping (CaCO_3) sehingga ketika dipakai harus dibersihkan terlebih dahulu. Komposisi Asbuton terdiri dari : 30% bitumen, 65% mineral, 5% bahan lain; (iii) Aspal minyak atau *petroleum* penyaringan *crude oil*. Mutu aspal minyak tergantung dari jenis *crude oil* yang dihasilkan. Semakin baik *crude oil* yang dihasilkan maka mutu aspal minyak juga semakin baik. Aspal minyak terdiri dari senyawa kimia hydrogen (H) dan carbon (C) yang kompleks sehingga proses produksinya cukup sulit. Bahan dasar aspal minyak yang diperoleh dari penyaringan *crude oil* akan menghasilkan bahan bakar dan residu, kemudian apabila disaring kembali akan menghasilkan

aspal/bitumen sedangkan bahan aspal yang berasal nabati akan menghasilkan tar yang agak berbau; (iv) Aspal semen (AC), yaitu proses pembuatannya diberi bahan tambahan *propane* (C_3H_8) sehingga disebut *propane diasphalting proses* (Suprpto, 2004).

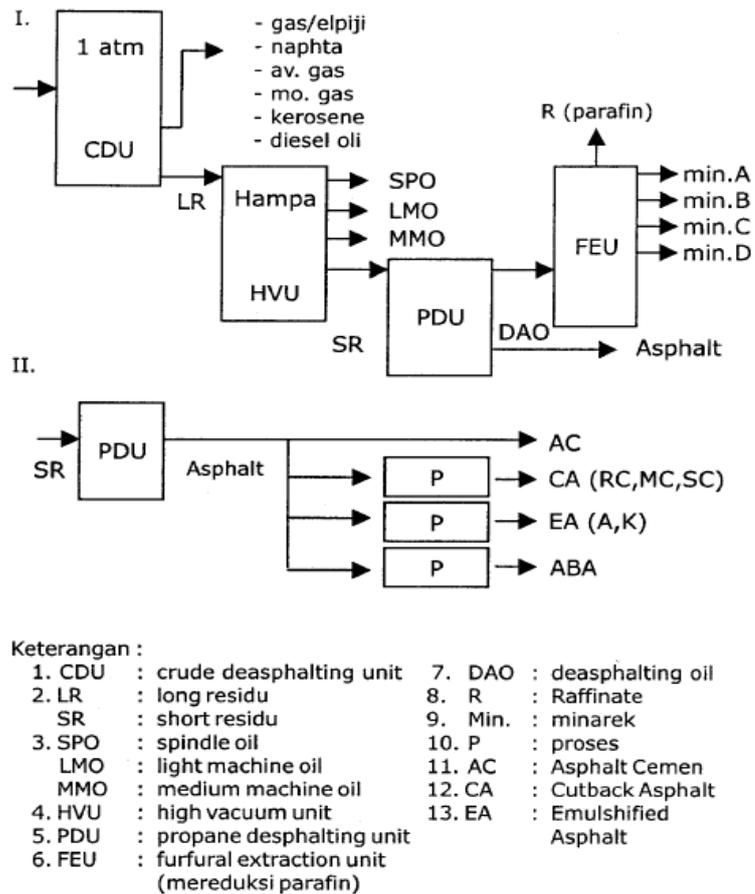
Tabel 2.2. Kandungan mineral dalam aspal

Mineral	Kandungan (%)
Calcium karbonat ($CaCO_3$)	81,62 - 85,27
Magnesium karbonat ($MgCO_3$)	1,98 - 2,25
Kalsium sulfat ($CaSO_4$)	1,25 - 1,7
Kalsium sulfida (CaS)	0,17 - 0,33
Air kahlen/hablur/Kristal	1,3 - 215
Silikat oksida (SiO)	6,95 - 8,25
Aluminium oksida (Al_2O_3) dan Feri oksida (Fe_2O_3)	2,15 - 2,84
Sisa	0,83 - 1,12

Sumber : Suprpto, 2004

Di dalam konstruksi perkerasan jalan, aspal berfungsi sebagai perekat antar material menjadi satu kesatuan sehingga menjadi kokoh. Aspal mengisi celah antara batu, pasir dan dapat mengurangi porositas konstruksi perkerasan jalan serta mencegah masuknya air ke dalam badan jalan.

Sebagai bagian dari material konstruksi perkerasan jalan, aspal mempunyai beberapa sifat yaitu *adesi* dan *kohesi* serta mempunyai ketahanan terhadap cuaca. *Adesi* adalah kemampuan aspal dalam menarik agregat satu dengan yang lain sehingga menjadi kompak, sedangkan *kohesi* adalah kekuatan aspal dalam menahan posisi agregat agar tidak berubah posisinya, dengan demikian konstruksi perkerasan jalan menjadi kuat (Ramlan, 2008).



Gambar 2.6. Diagram proses penyaringan minyak tanah hingga menjadi aspal.
 Sumber : suprapto, 2004.

2.2.2. Semen

Secara pengertian umum semen adalah material yang dapat menyatukan material lain menjadi padat. Dibidang teknik konstruksi, semen adalah bahan hidrolis apabila dicampur dengan air dengan jumlah tertentu dapat menjadi perekat material lain. Semen portland adalah material semen yang dibuat dengan cara menghaluskan klinker dan gipsum. Klinker adalah campuran material dengan komposisi CaO , Al_2O_3 , Fe_2O_3 dan SiO_2 . Kecepatan proses pengeringan material dipengaruhi oleh komposisi campuran dari semen itu sendiri. Semen

portland telah digunakan sebagai bahan utama konstruksi beton baik secara umum maupun pada konstruksi yang khusus (Miftahussalam, 2008).

Menurut SNI 15-2049-2004, Semen portland komposit merupakan hasil pencampuran bahan pengikat hidrolis dengan semen portland dan gips, atau campuran antara sement Portland dengan bahan anorganik bahan pengikat hidrolis hasil penggilingan bersama-sama terak semen portland dan gips. Bahan anorganik tersebut antara lain terak tanur tinggi (*blast furnace slag*), pozolan, senyawa silikat, batu kapur, dengan kadar total bahan anorganik 6% - 35 % dari massa semen portland komposit.

Semen portland komposit dapat digunakan untuk konstruksi umum seperti: pekerjaan beton, pemasangan bata, selokan, jalan, pagar dinding dan pembuatan elemen bangunan khusus seperti beton pracetak, beton pratekan, panel beton, bata beton (*paving block*) dan sebagainya.

Syarat kimia untuk semen portland komposit yaitu SO_3 maksimum 4,0 % dan syarat fisika dapat dilihat pada tabel di bawah ini.

Tabel 2.3. Syarat fisika semen

No.	Uraian	Satuan	Persyaratan
1.	Kehalusan dengan alat blaine	m ² /kg	min. 280
2.	Kekekalan bentuk dengan utoclave:		
	- pemuaian	%	maks. 0,80
	- penyusutan	%	maks. 0,20
3.	Waktu pengikatan dengan alat vicat:		
	- pengikatan awal	menit	min. 45
	- pengikatan akhir	menit	maks. 375

4.	Kuat tekan:		
	- umur 3 hari	kg/cm ²	min. 125
	- umur 7 hari	kg/cm ²	min. 200
	- umur 28 hari	kg/cm ²	min. 250
5.	Pengikatan semu:		
	- penetrasi akhir	%	min. 50
6.	Kandungan udara dalam mortar	% volume	maks.12

Sumber : SNI 15-7064-2004.

Klasifikasi semen menurut SNI 03-6861.1-2002 dapat disebutkan sebagai berikut : (i) Tipe 1, penggunaan untuk konstruksi pada umumnya. Konstruksi tidak menuntut persyaratan khusus dalam penggunaan semen sebagai bahan ikat beton; (ii) Tipe 2, penggunaan untuk konstruksi pada umumnya. Tuntutan persyaratan konstruksi adalah penggunaan semen untuk konstruksi yang tahan terhadap sulfat dan panas hidrasi sedang; (iii) Tipe 3, penggunaan untuk konstruksi yang menuntut persyaratan kekuatan awal tinggi; (iv) Tipe 4, penggunaan untuk konstruksi yang menuntut persyaratan panas hidrasi rendah; (v) Tipe 5, penggunaan untuk konstruksi yang menuntut persyaratan sangat tahan terhadap sulfat.

2.2.3. Batu, kerikil dan pasir sebagai agregat

Agregat adalah material yang digunakan untuk konstruksi perkerasan jalan yang merupakan satu kesatuan dan mempunyai gradasi tertentu serta memikul beban lalu lintas secara bersama-sama.

Untuk konstruksi perkerasan yang kokoh diperlukan syarat-syarat mutu agregat tertentu diantaranya kekerasan agregat, permukaan butir agregat,

kelekatan agregat terhadap aspal dan ketahanan agregat terhadap cuaca (Aminsyah, 2010).

Tabel 2.4. Persyaratan mutu agregat

Sifat-sifat	Agregat untuk Lapis Pondasi		Agregat untuk Lapis Pondasi Bawah	
	Kasar	Halus	Kasar	Halus
Keausan dengan alat abrasi, maksimum. *)	40%	-	50%	-
Indeks plastisitas, IP, maksimum.	-	10%	-	10%

*) Pengujian agregat terhadap agregat yang tidak terselimuti aspal dan atau agregat baru

Sumber : Pedoman Konstruksi dan Bangunan Pd T-08-2005 (Departemen PU, 2005)

Sesuai dengan ukuran butirannya material perkerasan jalan/agregat dibagi menjadi beberapa ukuran yaitu : (i) agregat kasar adalah material yang tertahan pada saringan nomor 4; (ii) agregat halus adalah material yang tertahan pada saringan nomor 4 dan nomor 200; (3) filler/pengisi material yang lolos saringan nomor 200 (Suprpto, 2004).

Menurut SNI 03-2847-1992 dijelaskan bahwa agregat adalah material granular yang terdiri dari pasir, kerikil, batu pecah dan kerak tungku pembakaran besi yang digunakan bersama-sama dengan suatu media pengikat membentuk adukan. Agregat merupakan komponen utama dari lapisan perkerasan jalan yaitu mengandung 90-95% agregat berdasarkan persentase berat dan 75-85% agregat berdasarkan persentase volume.

Apabila agregat yang akan digunakan tersebut tidak memenuhi syarat maka harus diperbaiki sifat-sifat fisik agregat tersebut dengan cara

menggabungkan beberapa agregat yang lain atau dilakukan stabilisasi dengan bahan pengikat (semen atau aspal) untuk meningkatkan kekuatannya. Agregat yang digunakan untuk konstruksi perkerasan jalan dikelompokkan berdasarkan : (i) Asal, dibedakan atas batuan beku, batuan endapan, batuan malihan; (ii) Proses pengolahan, dibedakan atas agregat alam, agregat pecah, agregat daur ulang , agregat buatan; (iii) Berdasarkan penggunaannya di lapangan, dibedakan atas gradasinya; (iv) Berdasarkan ukuran butiran, ditunjukkan pada tabel di bawah ini.

Tabel 2.5. Jenis agregat berdasarkan ukurannya

No	Jenis agregat	The asphalt institute dan Depkimpraswill	Bina Marga
1.	Agregat Kasar	> No.8 (2,36 mm)	>No.4 (4,75 mm)
2.	Agregat Halus	< No.8 (2,36 mm)	<No.4 (4,75 mm)
3.	Filler	Lolos no.30 (0.60 mm)	75% lolos no.200 (0.075 mm)

Sumber : (Sukirman, 1999)

Sifat-sifat fisik agregat yang mempengaruhi campuran material perkerasan jalan antara lain : (i) Berat jenis, untuk menentukan isi pori suatu campuran. Hal ini diperlukan didalam proses pemadatan campuran agregat di lapangan; (ii) Kekerasan agregat, dibutuhkan untuk kestabilan konstruksi jalan terhadap beban lalu lintas; (iii) Gradasi agregat, susunan butiran agregat sangat menentukan kekuatannya, gradasi menerus pada campuran butiran mempunyai stabilitas tinggi sedangkan gradasi terbuka mempunyai stabilitas rendah; (iv) Durabilitas, agregat yang digunakan dalam konstruksi jalan harus tahan terhadap perubahan kondisi lingkungan sekitarnya serta cuaca; (v) Bentuk butir dan Tekstur Permukaan, semakin banyak prosentasi

pecah agregat, maka semakin tinggi kekuatan campuran agregat tersebut. Penggunaan agregat yang berbentuk pipih dan panjang mengakibatkan segregasi selama proses pencampuran dan mempunyai kekuatan rendah. Tekstur agregat berpengaruh dalam pengikatan antara agregat dengan aspal. Permukaan agregat yang halus mudah dilabur dengan aspal, namun sulit mempertahankan film aspal agar tetap melekat; (vi) Kebersihan agregat, kebersihan agregat mempengaruhi kekuatan campuran agregat tersebut. Semakin kotor agregat akan menaikkan indeks plastisitasnya maka semakin menurun kekuatan agregat tersebut; (vii) Kadar air, kadar air berpengaruh dalam proses pemadatan agar didapatkan kepadatan lapangan yang diizinkan (Departemen PU, 2005).

Tabel 2.6. Gradasi campuran material garukan

Ukuran Saringan (ASTM)	Presentse yang lolos saringan	
	Lapis Pondasi	Lapis Pondasi Bawah
2" (50,0 mm)		
1 1/2" (37,5 mm)	100	88 – 95
1" (25,0 mm)	79 – 85	70 – 85
3/8" (9,50 mm)	44 – 58	30 – 65
No.4 (4,75 mm)	29 – 44	25 – 55
No.10 (2,0 mm)	17 – 30	15 – 40
No.40 (0,425 mm)	7 – 17	8 – 20
No.200 (0,075 mm)	2 - 8	2 – 8

Sumber : Pedoman Konstruksi dan Bangunan Td T-08-2005-B (Departemen PU, 2005)

Menurut SNI 03-1742-1989 kepadatan campuran material perkerasan jalan mempunyai peran yang dominan dalam menentukan kekuatan konstruksi perkerasan, nilai kepadatan campuran dinyatakan dalam berat isi kering (γ_d). Untuk mencari nilai kepadatan tertentu harus dilakukan dalam kondisi

kadar air optimum (w_{opt}) dan berat isi kering (γ_d) maksimum dengan melakukan uji proctor standar atau proctor *modified*.

2.2.4. Air

Konstruksi daur ulang perkerasan jalan yang distabilisasi dengan semen menggunakan air sebagai perekat agregat sehingga mempunyai kekuatan tertentu. Air yang digunakan dalam mencampur, merawat material lapis perkerasan daur ulang harus bebas dari minyak, sulfat dan klorida atau bahan lain yang menyebabkan kegagalan konstruksi (Departemen PU, 2005).

Tabel 2.7. ketentuan air

No.	Macam pengujian	Persyaratan	Cara pengujian
1.	pH	4,5-8,5	SNI 06-2423-1991
2.	Bahan organik	Maksimum 2000 ppm	SNI 03-6817-2002
3.	Minyak mineral	<2% berat semen	SNI M68-1990-03
4.	Kadar sulfat	<10000 ppm	SNI 06-2426-1991
5.	Kadar klorida	<20000 ppm	SNI 06-2431-1991

Sumber : Pedoman Konstruksi dan Bangunan Td T-08-2005-B (Departemen PU, 2005)

2.3. Pengelolaan Limbah Konstruksi

2.3.1. Menggunakan Prinsip 3Rs

Menurut Ervianto (2012), limbah konstruksi adalah sisa material yang dihasilkan dari produktifitas pekerjaan konstruksi mulai dari awal pekerjaan yang meliputi, pembongkaran, pembersihan lahan. Limbah konstruksi pada hakekatnya dapat digunakan kembali, maka biaya yang timbul harus dikelola seperti kegiatan proyek yang menggunakan sumber daya alam dan dampak yang terjadi terhadap kelestarian lingkungan.

Untuk mengurangi limbah konstruksi yang timbul pada kegiatan konstruksi dalam pelaksanaan proyek, maka secara skala prioritas kegiatan

penanganan limbah konstruksi diawali dengan pencegahan timbulnya limbah dalam kegiatan konstruksi, memakai material yang tidak menimbulkan limbah, meminimalisasi limbah, menggunakan lagi limbah, daur ulang, konversi limbah ke energi lain, dibuang ke lingkungan atau dapat digunakan prinsip 3Rs (*Reduce, Reuse, Recycle*).

Pengelolaan limbah/sampah dengan prinsip 3R dapat mengurangi ekstraksi sumber daya karena bahan baku dapat terpenuhi dari sampah/limbah yang didaur ulang dan digunakan ulang. Dampak lingkungan dengan diterapkannya prinsip 3R akan mengurangi beban pencemar (*pollutant load*) baik ke air, tanah maupun udara. Sesuai komitmen pemerintah untuk menurunkan emisi GRK sebesar 26% pada tahun 2020, sektor limbah dan sampah ditargetkan menurunkan emisi GRK sekitar 6,1%. Guna menurunkan emisi sebesar itu, sektor pengelolaan sampah/limbah untuk masing-masing kabupaten/kota harus melakukan pengurangan sampah/limbah minimal sebesar 7% melalui kegiatan 3Rs (Kambuaya, 2013).

Menurut Permen PU No.21 Tahun 2006 strategi yang dilakukan pemerintah dalam pengelolaan sampah /limbah melalui suatu pendekatan atau paradigma baru yang harus dipahami dan diikuti yaitu bahwa sampah dapat dikurangi, digunakan kembali dan atau didaur ulang; atau yang sering dikenal dengan istilah 3Rs (*Reduce, Reuse, Recycle*).

Dengan mengurangi sampah sejak di sumbernya maka beban pengelolaan kota akan dapat dikurangi dan anggaran serta fasilitas akan dapat semakin efisien

dimanfaatkan. Beban pencemaran dapat dikurangi dan lebih jauh lagi dapat meningkatkan daya dukung lingkungan.

Menurut USEPA (2009), limbah industri adalah produk sampingan dari proses industri seperti produk pembakaran batu bara, pembongkaran konstruksi bangunan yang semuanya mempunyai sifat fisik dan kimia sehingga apabila didaur ulang untuk konstruksi jalan akan mempunyai nilai ekonomi. Penggunaan limbah industri sebagai bagian dari konservasi sumber daya, sebuah upaya untuk menghemat energi dan mengurangi emisi gas rumah kaca dengan mengelola bahan lebih efisien. Bahan daur ulang industri dapat digunakan untuk membuat infrastruktur hijau dengan membuat konstruksi jalan raya lebih tahan lama, konservasi sumber daya alam, mengurangi penggunaan energi, dan mengurangi emisi gas rumah kaca.

Manfaat limbah industri dari sisi lingkungan bahwa limbah industri banyak digunakan untuk menggantikan material baru sehingga melestarikan sumber daya alam mengurangi penggunaan energi dan polusi yang terkait dengan kegiatan. Misalnya, menggunakan *flyash* sebagai pengganti portland semen dalam beton sehingga mengurangi gas rumah kaca dan emisi energi yang berhubungan dengan produksi semen.

Ditinjau dari aspek ekonomi limbah industri yang digunakan sebagai pengganti material baru mempunyai nilai ekonomis yang tinggi berkaitan dengan pekerjaan konstruksi yaitu dapat saling menukar limbah, mengurangi biaya angkut, mengurangi pembuangan limbah industri ke TPA sehingga dapat menghemat kapasitas TPA.

Menurut UNEP (1999), strategi dalam upaya pencegahan dan pengurangan limbah yaitu dengan pendekatan 1E4Rs (*Elimination, Reduce, Reuse, Recycle, Recovery/Reclaim*).

Kebijakan Nasional Produksi Bersih yang dilaksanakan oleh pemerintah (KLH, 2003) dengan prinsip 5Rs (*Re-think, Re-use, Reduction, Recovery and Recycle*).

1. *Elimination* (pencegahan) adalah upaya untuk mencegah timbulan limbah langsung dari sumbernya, mulai dari bahan baku, proses produksi sampai produk.
2. *Re-think* (berpikir ulang), adalah suatu konsep pemikiran yang harus dimiliki pada saat awal kegiatan akan beroperasi, dengan implikasi : (i) Perubahan dalam pola produksi dan konsumsi berlaku baik pada proses maupun produk yang dihasilkan, sehingga harus dipahami betul analisis daur hidup produk; (ii) Upaya produksi bersih tidak dapat berhasil dilaksanakan tanpa adanya perubahan dalam pola pikir, sikap dan tingkah laku dari semua pihak terkait pemerintah, masyarakat maupun kalangan usaha.
3. *Reduce* (pengurangan) adalah upaya untuk menurunkan atau mengurangi timbulan limbah pada sumbernya.
4. *Reuse* (pakai ulang/penggunaan kembali) adalah upaya yang memungkinkan suatu limbah dapat digunakan kembali tanpa perlakuan fisika, kimia atau biologi.

5. *Recycle* (daur ulang) adalah upaya mendaur ulang limbah untuk memanfaatkan limbah dengan memprosesnya kembali ke proses semula melalui perlakuan fisika, kimia dan biologi.
6. *Recovery/ Reclaim* (pungut ulang, ambil ulang) adalah upaya mengambil bahan-bahan yang masih mempunyai nilai ekonomi tinggi dari suatu limbah, kemudian dikembalikan ke dalam proses produksi dengan atau tanpa perlakuan fisika, kimia dan biologi.

Strategi yang harus dilakukan dalam konsep produksi bersih yaitu dengan strategi 1E4Rs atau 5Rs, namun yang perlu tekankan pertama kali adalah pada Pencegahan dan Pengurangan (1E1R) atau 2R. Bila strategi 1E1R atau 2R pertama masih menimbulkan pencemar atau limbah, maka selanjutnya dilakukan strategi 3R (*reuse, recycle, dan recovery*) yang merupakan tahapan strategi dalam pengelolaan limbah.

Menurut UNEP (2004), Produksi Bersih adalah strategi untuk meminimalkan limbah melalui berbagai cara yaitu pencegahan limbah melalui rumah tangga, memperbaiki proses manajemen, baru atau perubahan proses produksi yang meliputi peralatan, teknologi, substitusi bahan, pemakaian kembali, pemulihan produk dan mengubah atau menggunakan produk secara keseluruhan dengan meminimalkan limbah secara terus menerus dalam kegiatan yang sedang berlangsung sebagai upaya penghematan energi, meningkatkan efisiensi dan mengurangi resiko terhadap lingkungan.

Menurut Purwanto (2005), Produksi Bersih adalah kegiatan efisiensi penggunaan bahan baku, air dan energi, mencegah terjadinya pencemaran

guna meningkatkan produktifitas serta meminimalisir terjadinya limbah. Pencegahan pencemaran dapat diistilahkan dengan Produksi Bersih. Dalam pendekatan bisnis yang menekankan peningkatan efisiensi secara ekonomi dan lingkungan disebut *Eco-efficiency*.

Kata kunci Produksi Bersih yang dipakai dalam pengelolaan yaitu pencegahan pencemaran, proses, produk, jasa, peningkatan efisiensi, minimisasi resiko. Dengan demikian diperlukan perubahan sikap, pelaksanaan manajemen yang berorientasi pada lingkungan dan mengembangkan teknologi yang sesuai dengan kondisi lingkungan yang diharapkan.

Produksi Bersih dapat diterapkan diberbagai bidang kegiatan mulai dari pengambilan bahan termasuk pertambangan, proses produksi, pertanian, perikanan, pariwisata, perhubungan, konservasi energi, rumah sakit, rumah makan, perhotelan, sampai pada sistem informasi.

Dibidang jasa penerapan Produksi Bersih dilakukan pada kegiatan perancangan dan layanan jasa yang dipadukan dengan aspek lingkungan di dalamnya.

Apabila upaya produksi bersih sudah tidak dapat dilakukan maka tahapan terakhir dalam pengelolaan lingkungan adalah pengolahan dan pembuangan limbah, tetapi sebelumnya harus dilakukan dengan berbagai cara yaitu :

1. *Treatment* (pengolahan) dilakukan apabila seluruh tingkatan produksi bersih telah dikerjakan, sehingga limbah yang masih ditimbulkan perlu

untuk dilakukan pengolahan agar buangan memenuhi baku mutu lingkungan.

2. *Disposal* (pembuangan) limbah bagi limbah yang telah diolah. Pengolahan dan pembuangan jenis limbah yang berbahaya dan beracun harus dilakukan penanganan secara khusus.

Menurut Afmar (1999), membagi teknik pelaksanaan Produksi Bersih menjadi beberapa tahap antara lain :

1. Pengurangan pada sumbernya adalah kegiatan mengurangi atau meminimasi limbah pada sumbernya. Kegiatan ini meliputi: (i) Perubahan produk, yaitu perancangan ulang produk, proses dan jasa yang dihasilkan sehingga akan terjadi perubahan produk, proses dan jasa. Perubahan ini dapat bersifat komprehensif maupun radikal dengan melakukan beberapa cara yaitu substitusi produk, konservasi produk, Perubahan komposisi produk. (ii) Perubahan material input, dilaksanakan untuk mengurangi atau menghilangkan bahan berbahaya dan beracun yang masuk atau digunakan dalam proses produksi. (iii) Volume buangan diperkecil, dengan cara memisahkan limbah yang bersifat berbahaya dan beracun dengan limbah yang tidak beracun yaitu mengkonsentrasikan limbah untuk menghilangkan sejumlah komponen misalnya penyaringan atau pengendapan. (iv) Perubahan Teknologi, mencakup modifikasi proses dan peralatan. Tujuannya untuk mengurangi limbah dan emisi. Perubahan teknologi dapat dilaksanakan mulai dari yang sederhana dalam waktu singkat dan biaya yang murah sampai perubahan yang memerlukan

investasi tinggi. Pengeluaran biaya yang tinggi untuk memodifikasi peralatan akan diimbangi dengan adanya penghematan bahan, kecepatan produksi dan menurunnya biaya pengolahan limbah (Susanti, 1997). (v) Penerapan Operasi yang Baik (*good housekeeping*) adalah salah satu pilihan pengurangan pada sumber, mencakup tindakan prosedural, administratif atau institusional yang dapat digunakan di perusahaan untuk mengurangi terbentuknya limbah. Penerapan operasi ini melibatkan unsur-unsur pengawasan terhadap prosedur - prosedur operasi yang meliputi *Loss prevention*, praktek manajemen, segregasi limbah, perbaikan penanganan material dan penjadwalan produk.

Peningkatan *good house keeping* umumnya dapat meminimasi limbah antara 20% sampai 30% dengan biaya murah.

2. Daur Ulang

Daur ulang adalah pemanfaatan kembali limbah produksi dalam berbagai bentuk, antara lain: (i) Dikembalikan lagi ke proses semula; (ii) Sebagai bahan baku pengganti untuk proses produksi lain; (iii) Dipisahkan untuk diambil kembali bagian yang bermanfaat; (iv) Diolah kembali sebagai produk samping.

Ditinjau dari aspek ekonomi proses daur ulang limbah cenderung efektif dari segi biaya dibanding pengolahan limbah, tetapi yang perlu diperhatikan bahwa proses daur ulang limbah harus mempertimbangkan upaya pengurangan limbah pada sumbernya.

Konsep pembangunan berkelanjutan merupakan hal yang penting dalam pemilihan penggunaan material bangunan. Pengaruh penggunaan material konstruksi terhadap lingkungan harus dipertimbangkan melalui analisis yang matang dengan analogi sederhana mulai material diambil dari alam, dipakai pada konstruksi bangunan dan daur ulang material tersebut.

Untuk memudahkan analisis ada beberapa faktor yang harus diperhatikan antara lain : (i) Bangunan yang dirancang sudah mempertimbangkan buangan sampah saat pelaksanaan konstruksi; (ii) Bahan bangunan yang dipakai dapat diaur ulang; (iii) Keaslian material, berkaitan dengan sumber material dan lokasinya. Semakin jauh jarak sumber material maka akan menimbulkan dampak lingkungan yang berhubungan dengan moda transportasi; (iv) Energi yang diwujudkan, yaitu memperhitungkan energi dan biaya yang tidak tampak tetapi dibutuhkan dalam memproduksi material mulai awal produksi, pengangkutan ke lokasi proyek dan saat pemasangan di konstruksi bangunan; (v) Produksi material, yaitu saat awal produksi sudah memperhitungkan dampak material terhadap lingkungan, apakah material berbahaya terhadap pencemaran tanah, air dan polusi udara; (vi) Efek racun dari material, yaitu material yang dipakai saat konstruksi harus diperhitungkan dampak lingkungannya, seperti bahan cat dapat menimbulkan emisi awal saat pelaksanaannya; (vii) Memprioritaskan material alami seperti batu, tanah dan kayu menghasilkan racun relatif

sedikit sehingga polusi terhadap lingkungan dapat diminimalisir; (viii) Mempertimbangkan durabilitas dan umur produk, yaitu bahwa produk yang dihasilkan awet, mudah dan murah perawatannya (Siagian, 2005).

Produk ramah lingkungan menekankan peningkatan efisiensi dalam penggunaan air, energi, dan material bangunan, mulai dari desain, pembangunan, hingga pemeliharaan bangunan.

Penggunaan bahan bangunan yang tepat, efisien, dan ramah lingkungan, meminimalisir limbah, mengurangi pemakaian sumber daya alam tak terbarukan dengan optimalisasi bahan baku alternatif, dan menghemat penggunaan energi secara keseluruhan. Konstruksi yang berkelanjutan dilakukan dengan menggunakan bahan-bahan alternatif dan bahan bakar alternatif yang dapat mengurangi emisi CO₂ ke udara (Kompas.com, 2008).

Menurut Oe (2012), yang dimaksud dengan Bahan Bangunan Ramah Lingkungan adalah bahan bangunan yang mengalami proses perubahan transformasi atau teknologinya makin sedikit, tidak merusak lingkungan, dan tidak mengganggu kesehatan manusia.

Bahan Bangunan Ramah Lingkungan dapat digolongkan dalam 4 golongan yaitu : (i) Bahan bangunan yang dapat dibudidayakan kembali (*regeneratif*), seperti : kayu, bambu, rotan, rumbia, alang-alang; (ii) Bahan bangunan alam yang dapat digunakan kembali (*recycling*), seperti : tanah, pasir, kapur, batu, dan sejenisnya; (iii) Bahan bangunan buatan yang dapat digunakan kembali dalam fungsi yang berbeda. Bahan bangunan ini

didapat dari limbah / sampah dari perusahaan industri; (iv) Bahan bangunan alam yang mengalami perubahan transformasi sederhana, seperti : batu bata, genteng tanah liat dan sejenisnya.

Konsep pengelolaan sumber daya yang ditinjau dari aspek ekonomi dan lingkungan dikenal istilah eko-efisiensi adalah konsep ekonomi dalam menggunakan sumber daya secara efektif untuk memenuhi kebutuhan manusia. Apabila kegiatan efisiensi meningkat maka penggunaan sumber daya menurun sehingga biaya produksi menurun. Ketika biaya produksi menurun maka keuntungan/*profit* naik dan meningkatkan daya saing produk.

Ditinjau dari sisi lingkungan apabila kegiatan efisiensi meningkat maka mengurangi sumber daya yang terbuang. Ketika sumber daya yang terbuang semakin kecil maka jumlah limbah menurun sehingga potensi dampak lingkungan menurun menjadikan produksi ramah lingkungan. Konsep eko-efisiensi mempunyai makna efisiensi ekonomi dan efisiensi ekologi (Soemarwoto, 2005).

2.3.2. Konsep *End-of-Pipe Treatment*

Strategi mencegah kerusakan lingkungan secara preventif dan terpadu diterapkan secara terus menerus dilakukan pada proses produksi, pembuatan produk dan industri jasa dapat meningkatkan eko-efisiensi dan menjamin perikehidupan manusia serta makhluk hidup lainnya (UNEP, 2004).

Strategi pengelolaan lingkungan pada mulanya didasarkan pada pendekatan kapasitas daya dukung (*carrying capacity approach*). Konsep daya

dukung ini ternyata sulit untuk diterapkan mengingat kendala-kendala yang timbul dan sering kali harus dilakukan upaya untuk memperbaiki kondisi lingkungan yang kemudian tercemar dan rusak, sehingga menjadi mahal biayanya.

Pengendalian pencemaran dengan penerapan teknologi perlakuan akhir atau *end-of-pipe treatment technology*, merupakan konsep perintah dan pengendalian (*command and control*) yang hanya meninjau pembebanan pada salah satu media udara, air, atau tanah dan menyelesaikan satu masalah yang tertuju pada suatu kegiatan (ITB, 2009).

Prinsip *end of pipe treatment* ini merupakan suatu unit yang tidak perlu diubah prosesnya, sedangkan limbah yang dihasilkan oleh industri, diolah terlebih dahulu sebelum dibuang ke lingkungan. Agar limbah yang dihasilkan tidak mencemari lingkungan, unit pengolah limbah yang beroperasi diperlukan suatu peralatan dan biaya tertentu sehingga diperoleh hasil maksimal (Rochmadi, 2012).

Strategi pengelolaan lingkungan menjadi upaya untuk mengatasi masalah pencemaran dengan cara mengelola limbah yang terbentuk (*end-of-pipe treatment*), dengan harapan kualitas lingkungan hidup dapat lebih ditingkatkan.

Konsep pencegahan pencemaran dapat digambarkan sebagai penggunaan proses, praktek, bahan dan energi guna menghindarkan atau mengurangi timbulnya pencemaran dan limbah. Pencegahan pencemaran secara fundamental mengalihkan fokus perlindungan lingkungan dari penanggulangan melalui *end-of-pipe treatment* yang reaktif dengan pengolahan pencemaran setelah terjadinya

pencemaran ke pemikiran *front-of-process* yang preventif dengan penekanan bahwa pencemaran seharusnya tidak boleh terjadi. Strategi pengelolaan lingkungan yang bersifat proaktif, preventif dan *front of process* dikenal dengan nama Produksi Bersih (Yance, 2004).

2.4. Daur Ulang Lapis Perkerasan Jalan (RAP)

Konstruksi daur ulang perkerasan jalan dimulai pada tahun 1915 yang dilakukan oleh Warren Brother. Di amerika serikat timur pada tahun 1930 terjadi peningkatan harga yang cukup tinggi sehingga berupaya melakukan daur ulang untuk pekerjaan konstruksi jalan.

Pada awal dan akhir perang dunia ke-2 pekerjaan konstruksi daur ulang perkerasan jalan betul-betul dilakukan secara apa adanya tanpa penambahan bahan yang lain.

Ketika pada tahun 1956 metode daur ulang perkerasan jalan telah mengalami perkembangan dengan penambahan bahan penguat sehingga digunakan dalam perawatan jalan.

Federal Highway Administration (FHWA) USA pada tahun 1976 telah mendorong perkembangan konstruksi daur ulang ke daerah-daerah lain di Amerika hingga tahun 1980 dan pengaruhnya sampai ke negara-negara lain di dunia (Kinney, 1980).

Penelitian daur ulang perkerasan jalan dengan campuran *foam bitument* yang dilakukan oleh Wood (1983), menyatakan daur ulang material perkerasan jalan aspal merupakan metode rekonstruksi yang efektif dan efisien. Penelitian

sebelumnya telah dilakukan oleh Departemen Pekerjaan Umum Indiana Amerika Serikat tahun 1981 yang menggunakan foam bitument sebagai bahan pengikat konstruksi daur ulang perkerasan jalan dengan mengadakan uji coba di lapangan sepanjang 14 km.

Mengacu pada standar pelaksanaan daur ulang perkerasan jalan yang diterbitkan oleh *Departments of The Army, and The Air Force, ARMY TM 5-822-10* (1988), dinyatakan bahwa daur ulang material perkerasan jalan yang diproses secara dingin dapat menggunakan bahan campuran antara lain kapur, semen dan aspal. Konstruksi daur ulang tidak menambah elevasi jalan dibanding dengan pelapisan ulang (*overlay*) perkerasan jalan secara konvensional, sehingga keamanan dan kenyamanan lingkungan terjaga khususnya pada penduduk di sekitar badan jalan.

Agrela F. (2012), menyatakan agregat daur ulang perkerasan jalan yang dicampur dengan semen telah digunakan di Spanyol untuk konstruksi *subbase*. Dalam penelitian tersebut juga dianalisis sifat-sifat bahan daur ulang antara lain kandungan asam sulfat (SO_3) harus lebih rendah dari 0,8% sebelum dicampur dengan semen.

Konstruksi daur ulang yang distabilisasi dengan semen mempunyai kinerja baik secara mekanik dan mempunyai kelenturan rendah terhadap beban yang bekerja.

Dongxing X. (2010), menerangkan bahwa kekuatan material daur ulang perkerasan jalan tergantung pada berat isi kering. Hasil analisisnya dijelaskan material daur ulang perkerasan jalan membutuhkan air relatif sedikit, kuat tekan

dan kuat tarik material campuran daur ulang berbanding eksponensial dengan berat isi keringnya dan berbanding lurus dengan masa perawatannya.

Campuran yang paling efektif untuk pekerjaan konstruksi daur ulang perkerasan jalan dengan perbandingan 65% material baru dan 35% menggunakan material daur ulang.

Widjayat D. (2010), menganalisis penggunaan *Reclaimed Asphalt Pavement* (RAP) di Amerika Serikat pada tahun 1996 sekitar 30%, setelah 30 tahun menggunakannya maka di masa depan RAP tidak lagi menjadi bahan alternatif tetapi merupakan material yang dibutuhkan dalam pekerjaan konstruksi jalan.

Dinyatakan juga bahwa pekerjaan daur ulang lapis perkerasan jalan dapat mengurangi penggunaan material baru, sehingga menghemat biaya konstruksi jalan, hemat energi, elevasi jalan dapat dipertahankan meningkatkan nilai ekonomis bahan garukan aspal dan cepat dalam pelaksanaannya (Wdjayat, 2009).

Menurut Pradani (2012), daur ulang material perkerasan jalan adalah digunakan kembali agregat dan aspal perkerasan lama sebagai bahan konstruksi perkerasan baru. Lapisan perkerasan lama digaruk dan diolah sesuai persyaratan tertentu sehingga menjadi konstruksi perkerasan baru yang kuat dan stabil.

Material perkerasan lama dapat digunakan kembali karena masih mempunyai daya tahan gradasi cukup baik walaupun telah mengalami penurunan kualitas tetapi dapat diperbaiki dengan melakukan rekayasa laboratorium.

1. Kelebihan daur ulang lapis perkerasan jalan yaitu :

- (i) Dapat mengembalikan kekuatan konstruksi secara sempurna karena kerusakan jalan yang dilapis ulang tidak mempunyai kekuatan sama; (ii)

Mengurangi penggunaan material baru, hemat energi dan biaya; (iii) Tidak menambah tinggi permukaan jalan, sehingga mengurangi banjir di sekitarnya; (iv) Dapat dikerjakan pada lapisan konstruksi jalan yang rusak saja.

2. Kekurangan daur ulang lapis perkerasan jalan yaitu :

(i) Diperlukan peralatan khusus karena pekerjaan daur ulang lapis perkerasan jalan memiliki metode tidak sama dengan metode lapis ulang (*overlay*); (ii) Dibutuhkan investasi awal yang cukup besar berkaitan dengan pengadaan peralatan *recycler* (Aly, 2007 dan Mardhatila, 2013).

Perbedaan jenis perkerasan antara *flexibel pavement*, *rigid pavement* dan *recycling* masing-masing mempunyai kelebihan dan kekurangan. Apabila telah diketahui keuntungan dan kerugian dari masing-masing jenis perkerasan dapat digunakan sebagai dasar untuk mengambil keputusan dalam menentukan jenis perkerasan yang akan digunakan.

Jenis lapis perkerasan yang dianalisis dalam disertasi ini adalah daur ulang lapis perkerasan jalan dengan memanfaatkan material bekas garukan lapis perkerasan lama.

Menurut Wirtgen (2004), material penyusun daur ulang perkerasan jalan dibedakan menjadi 3 jenis material yaitu material perkerasan lama (*reclaimed pavement*), material baru (agregat baru dan aspal) serta bahan penstabilisasi (semen, aspal emulsi, foam bitumen).

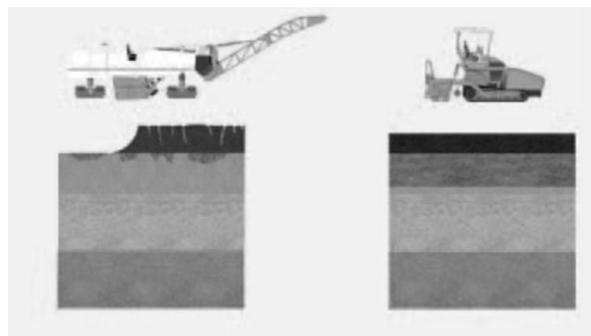
Bahan penstabilisasi sangat berpengaruh terhadap kekuatan lapis perkerasan daur ulang dan masing-masing bahan mempunyai karakteristik yang berbeda. Material daur ulang perkerasan jalan yang memakai semen mempunyai

sifat kaku tetapi kedap air, sedangkan material daur ulang perkerasan jalan yang menggunakan bahan penstabilisasi aspal bersifat lentur tetapi tidak kedap air. Untuk material daur ulang perkerasan jalan yang sudah mengandung aspal (RAP) apabila distabilisasi dengan semen akan menghasilkan lapis perkerasan yang mempunyai sifat semi lentur.

Material yang digunakan pada konstruksi *Cement Treated Recycling Base* (CTRB) terdiri dari material garukan perkerasan lama, agregat baru, semen portland, air. Konstruksi daur ulang /CTRB ini menghasilkan material padat yang digunakan sebagai pondasi atas (*base*) dan bentuknya mirip seperti beton (*soil concrete*) tetapi bersifat lentur karena di dalamnya mengandung aspal, sehingga sering disebut konstruksi *semi rigid pavement*.

Proses penggarukan

Pelapisan kembali



Gambar 2.7. Prinsip daur ulang lapis perkerasan jalan

Sumber : Wirtgen, 2010.

Material lapis perkerasan yang digaruk tergantung dari kondisi kerusakan jalan yang terjadi dan kedalamannya. Jika kerusakan hanya sampai lapis aus saja atau bahkan ke lapisan pondasi bawah maka proses penggarukan sampai ke kelapisan pondasi bawah tersebut.

Dalam proses konstruksi daur ulang lapis perkerasan digunakan agregat baru dengan tujuan meningkatkan nilai struktur konstruksi perkerasan dan memperbaiki gradasi campuran material garukan (Puslitbang, 2002).

Locander (2009), menyatakan konstruksi daur ulang perkerasan jalan dengan bahan RAP (*reclaimed asphalt pavement*) mempunyai kekuatan yang sama dibanding dengan konstruksi yang menggunakan material baru. RAP merupakan desain alternatif pada pekerjaan konstruksi jalan melalui proses penelitian dan pendekatan konstruksi sehingga RAP tersebut dapat digunakan di lapangan dan mempunyai kekuatan sesuai dengan standarisasi yang berlaku.

Material RAP dapat digunakan sebagai agregat pada konstruksi perkerasan bandara melalui penelitian mekanistik dengan mengkonversi kekuatan struktur perkerasan jalan raya diaplikasikan ke perkerasan bandara. Penelitian mekanistik tergantung pada struktur perkerasan, sifat material, suhu analisis, dan beban yang diterapkan sehingga setiap lokasi landasan yang berbeda diperlukan penelitian yang sama dan dimungkinkan mendapatkan hasil penelitian yang berbeda (Hajj, 2008).

Penggunaan material bongkaran lapis perkerasan aspal (RAP) dapat mengurangi biaya manufaktur perusahaan pencampur aspal. RAP dapat menggantikan bobot yang sama seperti agregat dan aspal baru, karena sebagian besar material bongkaran lapis perkerasan masih mengandung bahan pengikat aspal yang dapat digunakan kembali.

Dari hasil penelitian diterangkan bahwa penggunaan RAP dari 14%; 20%; 28% sampai 40% dapat dilakukan untuk lapis daur ulang perkerasan jalan,

menggunakan RAP adalah cara untuk mengurangi biaya penggunaan aspal baru (Ohio, 2005).

Lario R. (2000), menyatakan bahwa pekerjaan konstruksi daur ulang perkerasan jalan yang dilakukan ditempat/*insitu* lebih efektif dan efisien. Dari penelitian laboratoriumnya diterangkan material daur ulang yang ditabilisasi dengan semen dan aspal busa menghasilkan kuat tekan 14,4 Mpa, hasil uji kuat tekan bebas (UCS) campuran material daur ulang menghasilkan kuat tekan 1400 kpa sampai 2300 kpa dan dari hasil pengujian kuat tarik langsung (ITS) menghasilkan kuat tarik 40 kpa sampai 120 kpa.

Konstruksi daur ulang perkerasan jalan mempunyai ketangguhan untuk mencegah terjadinya retak reflektif pada lapis aus perkerasan sehingga proses terjadinya lubang pada jalan dapat diminimalisasi.

Okafor F.O., (2010), menyatakan bahwa kekuatan beton yang terbuat dari RAP tergantung pada kekuatan ikatan dari "*mortar asphalt*" (aspal pengikat-pasir sebagai pengisi) pelapisan terhadap agregat tidak dapat menghasilkan beton dengan kuat tekan di atas 25 MPa. Namun, untuk beton mutu menengah dan rendah, material RAP yang digunakan harus sebanding dengan agregat kerikil alam.

Su K. (2009), menyatakan kinerja lapis perkerasan jalan yang mengandung 40% dan 70% material daur ulang perkerasan jalan aspal lama dibandingkan dengan konstruksi jalan yang menggunakan material aspal baru. Hasil ini menunjukkan bahwa aspal daur ulang bisa mencapai sifat yang sama dengan penggunaan aspal baru. Aspal beton daur ulang yang mengandung 40%

RAP dapat digunakan sebagai lapis permukaan jalan, dari penelitian menunjukkan kinerja yang sama dari laboratorium dan uji perkerasan hasil eksperimen. Sebaliknya daur ulang mengandung RAP 70% tidak dianjurkan kekuatannya lebih rendah disbanding dengan konstruksi jalan dengan campuran material baru.

Ditjen Bina Marga Kemen PU. (2012), menyatakan penanganan teknologi daur ulang perkerasan jalan merupakan suatu alternatif untuk mengatasi masalah lingkungan dan memiliki beberapa keuntungan seperti dapat mengembalikan kekuatan perkerasan dan mempertahankan geometrik jalan serta mengatasi ketergantungan akan material baru (*virgin maerial*), mengurangi genangan air daerah sekitar jalan.

Martland G., (2011), menyatakan bahwa setiap kegiatan konstruksi jalan menghasilkan limbah antara 1 sampai 10%, dari limbah tersebut dapat dimanfaatkan lagi sekitar 50 sampai 80%.

Hasil pengolahan data AHP dijelaskan bahwa nilai prosentase alternatif pertama adalah daur ulang aspal sebesar 43,6%, alternatif ke-2 menggunakan Aspal Buton dengan nilai prosentase 26,7%, alternatif ke-3 menggunakan material baru/alam dengan nilai prosentase 16,4% dan alternatif ke-4 limbah aspal digunakan secara terpisah sebagai bahan kedap air dengan nilai prosentase sebesar 13,3%, hal ini menunjukkan bahwa daur ulang aspal merupakan alternatif terbaik untuk pekerjaan konstruksi jalan di Indonesia.

Guna mewujudkan efisiensi biaya konstruksi jalan maka diperlukan inovasi teknologi untuk mewujudkan konstruksi jalan yang aman, nyaman dan keselamatan bagi pengguna jalan.

Mc Daniel R. (2002), menyatakan bahwa campuran RAP sampai 50% disarankan digunakan untuk konstruksi jalan di bawah standar Superpave, tetapi gradasi RAP dan kualitas agregat harus baik. Secara umum, peningkatan isi RAP dari campuran meningkatkan kekakuan dan menurunkan regangan gesernya, serta meningkatkan resistensi terhadap deformasi. Penting untuk diperhatikan gradasi agregat RAP dan kualitasnya dalam desain campuran, karena apabila struktur agregat dalam campuran sedikit/kecil dapat mengurangi kekakuan campuran dan akhirnya menurunkan kinerja konstruksi jalan.

Nono (2009) dan Filippo G.(2011), menyatakan penggunaan lapis pondasi yang distabilisasi dengan semen memiliki nilai koefisien relatif tinggi sehingga meningkatkan nilai struktur dan mencegah kerusakan lingkungan. Penggunaan material bekas jalan raya dapat menghemat sumber daya alam dan biaya sekitar 20 sampai 40 persen, hemat BBM dan prosesnya lebih cepat 30 sampai 40 persen di banding dengan pekerjaan konstruksi dengan material baru.

Puslitbang Prasarana Transportasi (2002), menyatakan Nilai Kuat Tekan Bebas (KTB) pada proporsi campuran 60% RAP dan 40% agregat baru serta kadar semen 6% untuk umur 7 hari belum mencapai nilai KTB yang dipersyaratkan oleh spesifikasi SNI 03-3438-1994 (tanah semen). Makin besar prosentase penambahan agregat baru nilai KTB dan CBR makin tinggi dan kenaikan nilai KTB dengan penambahan agregat baru.

Pradnyana (2012), menyatakan bahwa lapis perkerasan *base course* yang menggunakan material daur ulang sangat direkomendasikan, campuran daur ulang untuk lapis perkerasan *base course* dapat menjadi alternatif pengganti base course konvensional sehingga menghemat biaya pekerjaan konstruksi dan dapat menjadi alternatif lain selain lapis perkerasan kaku/*Rigid Pavement*.

Hasil pengujian kuat tekan terhadap benda uji CTRB campuran dengan modifikasi 67% RAP + 33% sirtu kelas A didapat kuat tekan rata-rata paling tinggi untuk teknik curing semprot sebesar 105,1kgf/cm² dari persyaratan minimal 78kgf/cm². Dari hasil analisis biaya,).

Menurut Aly (2007), konstruksi daur ulang dibagi menjadi 2 jenis antara lain :

1. Konstruksi daur ulang diproses dalam campuran dingin.

Metode daur ulang campuran dingin (*cold recycling*) yang umum dipakai dalam konstruksi jalan dan apabila ditinjau dari penggunaan peralatan ada 2 macam yaitu : (i) Teknik daur ulang ditempat (*in-situ recycling*). Teknik daur ulang ini menggunakan mesin pendaur ulang digunakan pada lokasi pekerjaan (*in-place recycling machine*). Proses pemanasan lapis perkerasan, pembongkaran, pengemburan lapis lama, penambahan bahan baru (agregat, aspal dan bahan peremaja) pencampuran, serta perataan dilakukan oleh satu unit peralatan yang terdiri dari pemanas lapis permukaan perkerasan (*road preheater*), Alat bongkar lapis perkerasan (*hot milling*), Alat pencampur bahan lama dengan bahan baru

(*pugmill mixer*), Alat penghampar (*paver/finisher*), Alat perata dan pematat (*compacting screed*) menjadi satu rangkaian sehingga dibutuhkan waktu relatif singkat disbanding dengan pekerjaan konvensional; (ii) Teknik daur ulang di pusat pencampuran (*in-plant recycling*), Pada teknik ini material bongkaran jalan lama hasil penggarukan (*milling*) diangkut ke unit pencampur aspal (AMP) tipe *Bach* atau *Continuous* yang telah dimodifikasi. Didalam unit ini material bongkaran tersebut dicampur dengan material baru yaitu agregat, aspal dan bahan peremaja bila diperlukan. Material yang sudah dicampur menjadi satu kesatuan kemudian diangkut ke lokasi pekerjaan dan dihampar serta dipadatkan. Peralatan yang di perlukan untuk pelaksanaan daur ulang *plantmix* antara lain Alat penggaruk (*milling*), Unit pencampur aspal (AMP), Dump truck, Alat penghampar, Alat pematat. *Cold mix recycling* ini bisa dengan menambah semen dapat digunakan sebagai *Cement Treated Recycling Base (CTRB)* dan *Cement Treated Recycling Sub Base (CTRSB)* dan pengikat aspal emulsi atau pengikat foam bitumen biasa disebut CMRFB (*Cold Mix Recycling by Foam Bitumen*) Base.

2. Konstruksi daur ulang diproses dalam campuran panas.

Pada teknik ini material bongkaran jalan lama hasil penggarukan (*milling*) diangkut ke unit pencampur aspal (AMP) dan dipanaskan kembali. Proses pencampuran di unit pengolah telah dimodifikasi sesuai

desain campuran, kemudian diangkut ke lokasi pekerjaan, dihampar dan dipadatkan sehingga menjadi konstruksi daur ulang perkerasan jalan.

2.5. Pengaruh Semen, Agregat dan Serat Karung Plastik

2.5.1. Pengaruh Semen Terhadap Agregat Daur Ulang.

Balitbang PU (2001), telah meneliti daur ulang konstruksi perkerasan jalan perkerasan yang distabilisasi semen dinyatakan bahwa dengan komposisi campuran terdiri dari 60% bahan garukan aspal dengan kadar aspal 4,65% dan ditambah 40% agregat baru, menghasilkan kuat tekan sebesar 32,50 kg/cm² pada masa perawatan di laboratorium selama 7 hari. Pemanfaatan bahan garukan dengan bahan tambah semen dari percobaan laboratorium dapat meningkatkan daya dukung sebesar 40%.

Penambahan kadar semen meningkatkan berat isi kering dan kuat tekan/*unconfined compressive strenght* (UCS) yang cukup signifikan.

Penelitian daur ulang lapis perkerasan jalan aspal yang distabilisasi dengan semen telah dilakukan oleh Puslitbang Jalan Jembatan tahun 2002.

Hasil penelitian disimpulkan bahwa Nilai Kuat Tekan Bebas (KTB) campuran dengan proporsi campuran 60% bahan garukan dan 40% agregat baru dan kadar semen 6% untuk umur 7 hari belum mencapai nilai KTB yang dipersyaratkan oleh spesifikasi SNI 03-3438-1994 (Puslitbang Prasarana Transportasi, 2002).

Al-Oraimi (2009), menjelaskan bahwa material daur ulang aspal mempunyai karakteristik kekuatan tertentu apabila dicampur dengan bahan

aditif seperti air dan semen. Faktor air semen berpengaruh pada kekuatan campuran daur ulang, semakin besar faktor air semen dalam campuran maka kekuatannya semakin menurun.

Campuran daur ulang yang efektif dirancang dengan faktor air semen antara 0,45 sampai 0,5 menghasilkan kuat tekan 33 Mpa sampai 50 Mpa dalam masa perawatan 28 hari. Untuk menaikkan kekuatan campuran daur ulang dengan memperkecil faktor air semen tersebut tetapi akan mengalami kesulitan dalam proses pencampurannya.

Xu (2011) menjelaskan bahwa proses pencampuran material daur ulang perkerasan jalan yang ditabilisasi semen akan meningkatkan kekuatan lapis perkerasan. Kadar semen mempengaruhi nilai kuat tarik langsung (ITS *wet*) lebih besar dari pada ITS *dry*.

Kekuatan campuran daur ulang material perkerasan jalan akan meningkat seiring dengan penambahan kadar semen sehingga campuran dapat digunakan sebagai lapis perkerasan yang memenuhi kualitas sesuai persyaratan tertentu seperti pada tabel di bawah ini.

Tabel 2.8. Kriteria kekuatan campuran daur ulang perkerasan dengan semen

Peruntukan	Kuat tekan bebas, pada umur 7 hari	
	Mpa	Kg/cm ²
Lapis pondasi	1,50-3,0	15-30
Lapis pondasi bawah	0,75-1,50	7,5-15

Sumber : Pedoman Konstruksi dan Bangunan Td T-08-2005-B (Departemen PU, 2005)

Untuk memperoleh kuat tekan bebas/nilai tegangan hancur benda uji menggunakan rumus :

$$f^c = P/A.....(2.1)$$

Keterangan,

f'_c = UCS (Nilai *Unconfined Compressive Strength*), satuan MPa

P = Beban maksimum, dalam satuan KN

A = Luas permukaan benda uji tertekan, satuan mm²

Adapun rumus yang digunakan dalam perhitungan besarnya kuat tarik belah yang terjadi pada benda uji silinder sesuai SNI 03-2491-1991 adalah :

$$f_t = \frac{2 \times P}{L \times D \times \pi} \dots \dots \dots (2.2)$$

Keterangan f_t = Kuat tarik (Kg/cm²)

P = Beban hancur (Kg),

D = Diameter silinder

L = Panjang silinder

Lario R. (2000), menyatakan daur ulang material perkerasan aspal yang ditabilisasi dengan semen menghasilkan kuat tekan bebas (UCS) 1400 kpa sampai 2300 kpa dan dari hasil pengujian kuat tarik langsung (ITS) menghasilkan kuat tarik 40 kpa sampai 120 kpa.

Ketangguhan konstruksi daur ulang perkerasan jalan dapat mencegah terjadinya retak reflektif pada lapis aus perkerasan sehingga mengurangi terjadinya lubang pada lapis perkerasan jalan.

Semen berfungsi untuk stabilisasi dalam campuran *Cement Treated Base*, jumlah semen yang ditambahkan sangat mempengaruhi kekuatan campuran tersebut dan juga ditentukan oleh tipe bahan serta densitas bahan yang dicampur (Wirtgen, 2004).

Faktor yang paling dominan yang mempengaruhi kuat tekan beton adalah semen dan air.

Air dalam campuran beton membantu proses kimiawi, apabila jumlahnya ditingkatkan maka proses pengadukannya lebih mudah, tetapi menurunkan kuat beton (Nurlina S., 2008).

Penambahan semen meningkatkan berat isi kering relatif kecil tetapi berpengaruh pada kenaikan nilai KTB yang cukup besar, dan apabila digunakan kadar air rendah maka nilai KTB makin tinggi. Begitu pula sebaliknya apabila digunakan kadar relatif besar akan menurunkan nilai KTB cukup signifikan (Litbang PU 2001).

Penambahan semen pada campuran RAP dan agregat baru dapat menaikkan nilai CBR sehingga campuran tersebut dapat digunakan sebagai bahan lapis pondasi bawah dan pondasi atas jalan (Widodo S., 2013).

Pengaruh penambahan semen dalam campuran CTRB mengakibatkan penurunan kadar air optimum (OMC), sedangkan substitusi tras terhadap semen mengakibatkan sedikit peningkatan nilai OMC pada kedua campuran CTRB. Hal ini disebabkan karena, penambahan material tras mengakibatkan peningkatan kebutuhan pasta (semen dan air) dalam campuran, namun demikian besarnya kebutuhan air karena adanya penambahan tras tidaklah sebesar penambahan tras dalam campuran.

Pengaruh penambahan kadar material semen terhadap campuran CTRB yang mengandung 40% RAP mengakibatkan peningkatan berat isi kering (MDD), yaitu pada substitusi 15% Tras terhadap semen. Sedangkan

pada substitusi 30% tras terhadap semen mengakibatkan sedikit penurunan nilai MDD. Hal ini disebabkan karena kandungan material RAM yang cukup besar dalam campuran dapat diikat dengan mudah oleh semen, tetapi adanya substitusi tras terhadap semen mengakibatkan berkurangnya kadar semen dalam campuran sehingga mengurangi kandungan kalsium yang dapat bereaksi dengan tras dan berakibat pada penurunan kepadatan campuran.

Pengaruh penambahan semen pada campuran CTRB yang mengandung 60% RAP mengakibatkan peningkatan kepadatan (MDD) campuran (Waani E. J., 2014).

Menurunnya mutu campuran beton dapat disebabkan oleh beberapa faktor antara lain pengurangan semen, penambahan air serta kualitas material yang digunakan tidak sesuai dengan persyaratan teknis yang ditetapkan.

Rendahnya mutu beton juga diakibatkan dari pembuatan benda uji yang kurang baik akibat proses pembuatannya kurang sempurna terutama pada saat pemadatan benda uji (Rustendi I., 2012).

Proporsi campuran beton mempengaruhi kekuatannya, proporsi campuran yang menghasilkan kuat tekan yang diinginkan harus dilaksanakan dan diseleksi dengan cermat meliputi pemilihan material seperti semen, agregat halus, agregat kasar, air dan bagaimana cara mencampurnya sesuai spesifikasi teknis yang berlaku.

Pada proses pencampuran material harus diperhatikan pula faktor air semen, kemudahan dalam mengerjakannya, besaran butiran maksimal agregat

dan slump, tetapi yang dominan mempengaruhi kekuatan beton adalah proporsi campuran antara semen dan air (Oh W.J., 1999).

Kualitas beton ditentukan oleh struktur campurannya yang meliputi semen, air dan agregat serta bagaimana merawatnya setelah beton itu dicetak. Faktor jarak jarak pengangkutan juga mempengaruhi proses hidrasi semen, semakin jauh jaraknya antara proses produksi dengan lokasi proyek maka beton mengalami pengerasan sebelum dipasang.

Hal yang paling penting dalam proses pencampuran material beton adalah homogenitas dari semua material yang ada di dalamnya (Ferraris F.C., 2001).

Dalam teknologi beton, semen portland menjadi material pokok yang berfungsi, bersamadengan air, untuk mengikat dan menyatukan agregat menjadi masa padat.

Semen portland adalah semen hidrolis yang dihasilkan dengan cara menggiling terak semen portland terutama yang terdiri atas kalsium silikat yang bersifat hidrolis dan digiling bersama-sama dengan bahan tambahan berupa satu atau lebih bentuk kristal senyawa kalsium sulfat dan boleh ditambah dengan bahan tambahan lain (SNI 15-2049-2004).

Untuk bangunan yang tidak memerlukan persyaratan-persyaratan khusus, digunakan semen portland tipe I.

Hasil uji kuat tekan menunjukkan bahwa semakin bertambah umur beton semakin tinggi kekuatan beton yang dihasilkan. Hal ini berkaitan dengan proses pengerasan yang terjadi di dalam pasta semen sehubungan dengan perbedaan reaktivitas masing-masing mineral pembentuk semen.

Diketahui bahwa mineral C_3S yang lebih cepat bereaksi dengan air akan berkontribusi terhadap kekuatan awal sedangkan mineral C_2S yang bereaksi lebih lambat akan menyumbangkan kekuatan pada umur panjang (Salain K.A.Made I.,2009)

Suseno H. (2008) menyatakan kuat tekan beton ringan maksimum diperoleh dengan campuran kadar semen yang tinggi. Penambahan aditif *superplasticizer* akan memberikan nilai slump tinggi, tetapi apabila substitusi campuran melebihi dosis akan menurunkan kuat tekan tersebut.

Agregat kasar dan agregat halus (batu, pasir) akan menambah berat jenis beton apabila kadar semen yang dicampur pada beton juga tinggi sehingga menghasilkan kuat tekan tinggi karena fungsi semen untuk mengikat agregat agar tidak terjadi segregasi antar butiran sehingga membentuk volume beton menjadi kokoh dan kuat.

Pedoman Perencanaan Lapis Pondasi Hasil Daur Ulang Perkerasan Lama Departemen Pekerjaan Umum Pd.T-08-2005-B menyatakan bahwa untuk mencari kadar semen yang nantinya akan digunakan dalam rancangan campuran CTRB dilakukan percobaan benda uji dengan cara sebagai berikut : (i) Tentukan 5 variasi kadar semen untuk 5 set benda uji dengan rentang antara 1,5% - 7,5% terhadap berat total agregat, dengan interval sama; (ii) Untuk berbagai variasi kadar semen, kadar air optimum perkiraan ditetapkan (umumnya pada rentang 5% - 8% terhadap berat total agregat; untuk kadar semen yang rendah dipilih kadar air perkiraan yang rendah, demikian pula kadar semen yang tinggi dipilih kadar air perkiraan yang tinggi pula).

2.5.2. Waktu Perawatan (*Curing*)

Curing dapat diartikan perawatan beton setelah proses pencampuran semen dan agregatnya selesai, yang bertujuan untuk menjaga supaya beton tidak cepat kering atau kehilangan air serta menjaga kelembaban dan suhu beton.

Pelaksanaan *curing*/perawatan beton dilakukan segera setelah beton mengalami fase pengerasan (*hardening*) untuk permukaan beton yang terbuka atau setelah pembukaan cetakan/acuan/bekisting, selama waktu tertentu dimaksudkan untuk menjaga kondisi dalam proses reaksi senyawa kimia yang terkandung dalam campuran beton (Nji, 2013).

Ada beberapa peraturan didalam pelaksanaan perawatan beton/*curing* yang bertujuan untuk menjaga dan menjamin mutu pelaksanaan pembetonan yaitu :

(i) SNI 03-2847-2002 mensyaratkan *curing* selama 7 hari untuk beton normal dan 3 hari untuk beton dengan kuat tekan awal tinggi. (ii) *American Concrete Institute* (ACI 318) mensyaratkan curing dilakukan sampai tercapai minimal 70% kuat tekan beton yang disyaratkan (f_c'). (iii) *American Society for Testing and Materials* (ASTM-150) mensyaratkan semen tipe I, waktu minimum curing 7 hari; semen tipe II, waktu minimum curing 10 hari; semen tipe III, waktu minimum curing 3 hari; semen tipe IV atau V, waktu minimum curing 14 hari. (iv) Waktu curing yang dibutuhkan semen dalam material daur ulang bekas perkerasan jalan cukup singkat sehingga dalam proses pencampurannya harus dilakukan cepat (Xu, 2011).

2.5.3. Pengaruh batu pecah sebagai agregat baru (*Virgin Material*)

Penggunaan agregat baru pada proses daur ulang lapis perkerasan bertujuan meningkatkan nilai struktur konstruksi perkerasan dan memperbaiki gradasi campuran material bekas garukan (Puslitbang, 2002).

Pada saat campuran semen dan agregat mengalami proses pengeringan akan terjadi penyusutan, maka fungsi agregat meminimasi penyusutan karena karena pada campuran tersebut telah terjadi keterikatan antara semen dan agregat yang kuat sehingga dapat mengontrol ekuatan campuran agregat dan semen.

Sifat agregat mempengaruhi kekuatan campuran, seperti kekerasan agregat dan teksturnya. Permukaan agregat yang kasar dan mempunyai kekerasan tinggi akan menghasilkan kekuatan yang tinggi dibanding dengan permukaan agregat yang halus dan mempunyai kekerasan rendah (Suprpto H., 2008).

Proporsi agregat baru (batu pecah) dalam campuran beton apabila dikurangi dan digantikan dengan material lain akan mengalami penurunan kuat tekannya seiring dengan pengurangan jumlah agregat baru dalam campuran beton tersebut (Zuraidah S., 2007).

Ohio (2005), menyatakan bahwa penggunaan RAP sebagai agregat sampai 40% dapat dilakukan untuk lapis daur ulang perkerasan jalan, sehingga dapat mengurangi penggunaan agregat baru (*virgin material*) dan aspal baru sehingga mengurangi kerusakan lingkungan akibat penambangan dan pencemaran udara pada proses pembakaran aspal.

Penggunaan material *recycle* dalam campuran beton di Indonesia masih jarang tetapi banyak digunakan untuk pengurukan dan lapisan pondasi jalan. Hal ini beranggapan bahwa bahan bangunan seperti semen dan agregat kasar maupun halus mudah didapat. Padahal persediaan material alam tersebut semakin menipis (*depleksi*) sehingga menyebabkan harga material semakin mahal. Terutama agregat kasar atau kerikil yang hampir 78 % menjadi bahan pengisi utama campuran beton. Melihat permasalahan ini maka perlu melakukan pemanfaatan kembali atau daur ulang material bekas bongkaran atau puing-puing bangunan. Perlu dilakukan juga penelitian dari berbagai jenis material sebagai pengganti agregat kasar.

Fungsi penggunaan agregat adalah menghasilkan kekuatan yang besar pada beton, mengurangi susut pengerasan beton dan dengan gradasi yang baik akan didapatkan beton yang kokoh. Agregat yang digunakan dalam beton berfungsi sebagai bahan pengisi, namun karena prosentase agregat yang besar dalam volume campuran, maka agregat memberikan kontribusi terhadap kekuatan beton. Sifat yang paling dominan agregat (batu, kerikil dan pasir) ialah mempunyai kekuatan hancur dan ketahanan terhadap benturan, yang dapat mempengaruhi ikatannya dengan pasta semen (Febriyatno H., 2009).

Sutapa A. A. Gede (2011), menyatakan bahwa dari hasil penelitian menunjukkan bahwa peningkatan porositas beton sebanding dengan volume beton. Hal lain juga menunjukkan bahwa porositas beton yang meningkat sebesar menyebabkan kuat tekan.

Warsiti (2007), menyatakan besarnya kuat tekan beton berbanding lurus dengan jumlah persentase agregat kasar (batu pecah), apabila jumlah agregat (batu pecah) dikurangi dan diganti material lain seperti pecahan

genteng 50% maka terjadi penurunan kuat tekan sebesar 31,32%. Dengan demikian, dapat diambil kesimpulan bahwa penambahan pecahan genteng menurunkan kuat tekan beton.

Penambangan marmer yang terjadi pada Gunung Batu Naitapan menghasilkan limbah berupa serbuk dan bongkahan marmer. Upaya untuk memanfaatkan limbah ini adalah sebagai alternatif pengganti agregat pada campuran beton.

Limbah marmer digunakan pada 3 perlakuan substitusi yaitu serbuk marmer terhadap pasir, bongkahan marmer terhadap batu pecah dan serbuk marmer dan bongkahan marmer pada pasir dan batu pecah. Presentase pada substitusi adalah 25%, 50%, 75%, 100%.

Berdasarkan hasil pengujian, untuk beton yang disubstitusi serbuk marmer terhadap agregat (pasir) dan substitusi serbuk marmer dan bongkahan marmer terhadap agregat (pasir, batu pecah) sampai substitusi 75% meningkatkan kuat tekan sedangkan ketika agregat (batu pecah, pasir) tidak digunakan sama sekali dalam campuran/substitusi 100% kuat tekan menjadi turun. Jadi bongkahan marmer tidak dapat mengganti material batu pecah sebagai material dominan pada campuran beton secara keseluruhan (Nauk S.P., 2012).

Campuran CTRB yang mengandung RAP sebesar 60% akan menurunkan nilai kadar air optimum, besarnya kandungan RAP (60%) dalam campuran menghalangi proses penyerapan air ke dalam pori-pori agregat RAP,

karena adanya aspal yang membungkus permukaan agregat RAP mengakibatkan kurangnya kadar air yang dibutuhkan untuk proses pemadatan.

Komposisi campuran 40% RAP: 60% RAM mengakibatkan penyerapan air lebih besar karena agregat RAM lebih banyak membutuhkan air sehingga meningkatkan nilai kadar air optimum. Campuran CTRB yang mengandung 40% RAP : 60% RAM ini, cukup tinggi dibandingkan dengan komposisi campuran 60%RAP: 40%RAM. Penyerapan air pada campuran yang mengandung 60% RAM sebesar 4,74% untuk agregat halus dan 6,25% untuk agregatkasar.

Kepadatan kering maksimum dari campuran yang mengandung 60% RAP sedikit lebih tinggi dibandingkan dengan campuran CTRB yang mengandung 40% RAP. Hal ini disebabkan karena kadar aspal yang terkandung dalam campuran yang mengandung 60% RAP cukup besar, aspal tersebut berperan sebagai pelumas selama proses pemadatan dan berpengaruh positif pada peningkatan kepadatan campuran (Waani E. J., 2014).

Hidayat N.A. (2014) menyatakan bahwa campuran beton yang menggunakan agregat kasar batu apung mempunyai berat jenis $1815,26 \text{ kg/m}^3$ dan kuat tekan $18,42 \text{ kg/cm}^2$, untuk kuat tekan beton normal agregat batu apung belum memenuhi persyaratan.

Pada percobaan komposisi campuran agregat batu pecah mempunyai kuat tekan yang lebih besar dibandingkan dengan campuran beton yang disubstitusi dengan batu apung (*pumice*) yaitu $46,73 \text{ MPa}$ dan mempunyai berat jenis $2170,54 \text{ kg/m}^3$.

Agregat kasar batu apung sebagai campuran beton dapat digunakan untuk konstruksi beton ringan dan harus memenuhi syarat sesuai SNI- 03-2847- 2002, yaitu mempunyai berat jenis 1900kg/m^3 dan mempunyai kuat tekan tidak kurang $17,24\text{ kg/cm}^2$.

Kekuatan beton salah satunya dipengaruhi oleh interaksi atau *adhesi* antar pasta semen dengan agregat dalam hal ini adalah ikatan antara agregat dengan mortar. Bentuk partikel agregat yang bersudut memberikan ikatan antar agregat (*aggregate interlocking*) yang baik yang dapat menahan perpindahan atau displasemen agregat yang mungkin terjadi. Agregat yang bersudut tajam, berbentuk kubikal dan agregat yang memiliki lebih dari satu bidang pecah akan menghasilkan ikatan antar agregat yang paling baik (Hutagalung M., 2013).

2.5.4. Pengaruh Serat Karung Plastik Bekas (*polypropylene*)

Beton polimer atau PC (*Polymer Concrete*) terdiri dari material polimer dengan perekatnya berupa thermosetting polimer dan material pengisi beton tersebut agregat berupa kerikil dan pasir. Beton polimer memiliki sifat tahan terhadap penyerapan air, tidak terpengaruh sinar ultra violet, daya tahan korosi lebih baik, tahan terhadap larutan agresif seperti bahan kimia. Beton polimer dapat mengeras di dalam air sehingga bisa digunakan untuk memperbaiki bangunan-bangunan di dalam air (Pulungan A.H, 2014).

Serat karung plastik terbuat dari polimer *polypropylene* berbahan dasar dari penguraian minyak bumi (*naftan*) bersifat termoplastik. *Polypropylene*

terbentuk dari susunan kimia satuan monomer propilen dengan massa jenis 0.9007 gr/cm^3 dan mempunyai titik leleh 176°C (Diharjo K., 2006).

Menurut Tayyib (2011), sifat-sifat serat *polypropylene* yang baik yaitu:

(i) Susunan atom biasa dalam molekul *polymer* dan kristalisasi tinggi, bernama *Isotactic Polypropylene*; (ii) Titik leleh yang tinggi 165°C dan mampu digunakan pada temperatur 100°C dalam waktu yang lebih singkat; (iii) Kekakuan kimia menyebabkan bahan kuat terhadap hampir semua bahan kimia. Bahan kimia tidak akan menyerang beton dan juga tidak akan berpengaruh pada serat. Terhadap bahan kimia yang lebih ganas maka betonlah yang akan mengalami kerusakan terlebih dahulu; (iv) Permukaan yang *Hidrophobic*, tidak akan basah terkena pasta semen, membantu mencegah pukulan pada serat dan mengembang pada saat pencampuran, atau terletak pada tempat yang berbeda tidak perlu air; (v) Proses perenggangan *polymer* dalam serat, pada kuat tekan benang 159/denier, sama dengan kuat tekan $F_u = 400 \text{ MN/m}^2$; (vi) Pedoman menunjukkan kelemahan pada daerah lateral, dimana terdapat serabut. Matriks semen dapat menembus struktur rapat antara serabut sendiri dan membuat ikatan mekanik antara serat dan matriks.

Sifat-sifat yang dapat diperbaiki oleh *polypropylene* antara lain:

(i) Daktilitas : berhubungan dengan kemampuan dalam menyerap energi; (ii) Ketahanan terhadap beban kejut (*impact resistance*); (iii) Kemampuan menahan tarik dan momen lentur; (iv) Ketahanan terhadap kelelahan; (v) Ketahanan pengaruh susutan (*Shrinkage*); (vi) Ketahanan Aus; (vii) Ketahanan *Spalling*.

Hasil uji coba pemanfaatan serat sintetis di Indonesia ternyata mampu memberikan peningkatan kadar daktilitas sekitar 66% jika dibandingkan pelat beton biasa. Penambahan serat kedalam adukan dimaksudkan untuk menambah kuat tarik beton, mengingat kuat tarik beton sangatlah rendah. Kuat tarik yang rendah menyebabkan beton mudah retak dan tidak tahan terhadap benturan.

Keuntungan penambahan serat pada beton adalah akan memberi tahanan terhadap tegangan berimbang ke segala arah dan memberi keuntungan material struktur yang disiapkan untuk menahan beban dari berbagai arah. Selain itu, juga dapat terjadi perbaikan perilaku deformasi (runtuh). Seperti ketahanan terhadap impak, daktilitas yang lebih besar, kuat lentur, dan kapasitas torsi yang lebih baik.

Serat sintetis yang digunakan oleh Pusjatan memiliki sifat material *modified Olefein* dengan panjang 60 mm dan kuat tarik 640 MPa. Tekstur permukaannya berbentuk timbul bersulam menerus dengan jumlah serat per kilogram adalah 33.000 buah. Berat jenis dari serat yang digunakan adalah 0.90 – 0.92 dengan titik leleh 150-165 0C dan titik nyala lebih dari 450 0C. *Modulus youngs* yang dibutuhkan adalah 10 GPa. Serat sintetis adalah serat buatan yang diperoleh dari pengembangan produk petrokimia dan industri tekstil. Material ini dikenal dalam banyak jenis seperti *acrylyc*, *aramid*, *carbon*, *nylon*, *olyethylene* dan *polypropylene*. Serat ini mampu menyerap energi pasca terjadi keretakan dan kemungkinan *strain-hardening* (kejatuhan) akibat deformasi (runtuh). Penambahan serat juga mampu menghambat penyebaran

retak yang lebih besar sehingga beton memiliki sifat daktilitas yang tinggi (Dinamika Riset, 2010).

Kartini (2007), menyatakan bahwa kuat tekan beton tidak sebanding dengan kuat tariknya atau dapat dikatakan kuat tarik beton lebih kecil dibanding kuat tekannya. Untuk meningkatkan kuat tarik beton diperlukan bahan tambahan yang salah satunya adalah serat plastik *polypropylene*.

Hasil penelitian di laboratorium diketahui bahwa beton yang dicampur serat plastik *polypropylene* dengan perbandingan $0,9\text{kg/m}^3$ dapat meningkatkan kuat tarik beton sebesar 3,17 % dibanding tanpa menggunakan serat plastik *polypropylene* bahkan pada beton mutu tinggi meningkat menjadi 5,76 %.

Pembuatan komposit yang dicampur dengan serat karung plastik *polypropylene* dapat meningkatkan kuat tariknya. Peningkatan kuat tarik komposit tergantung komposisi campuran di dalamnya. Pada perbandingan 60/40 peningkatan regangan komposit mencapai puncaknya yaitu 63,71% (Hendra, 2006).

Widianti (2008), meneliti *embankment* tanah dicampur dengan serat karung plastik, abu sekam padi dan kapur dapat meningkatkan daya dukung tanah lebih tinggi dari pada dengan pemadatan biasa. Komposisi campuran tanah, kapur, abu sekam padi dan serat karung plastik yang homogen mempunyai daya dukung ultimit paling tinggi dan penurunan tanah vertikal lebih kecil.

Hasil tes laboratorium menyatakan bahwa daya dukung ultimit (q_u) *embankment* meningkat 2 kali sampai dengan 111 kali setelah distabilisasi

dibanding dengan daya dukung ultimit *embankment* tanah asli. Tanah yang dicampur kapur, abu sekam padi dan serat karung plastik dapat mengurangi penurunan vertikal *embankment*. Pada pembebanan 7,0 kN penurunan berkurang sebesar 2,5 % sampai dengan 65 % dari penurunan vertikal pada *embankment* tanah asli.

Muhrozi (1997), menyatakan bahwa limbah plastik dapat meningkatkan kuat geser tanah. Percobaan penelitiannya dilakukan dilaboratorium menggunakan benda uji tanah dicampur limbah plastik dari TPA Jati Barang Kabupaten Semarang.

Percobaan dilakukan 8 kali dan disimpulkan bahwa sisipan limbah plastik secara mendatar pada sampel tanah menghasilkan kuat geser lebih kecil dibanding dengan campuran plastik yang dipotong kecil-kecil.

Jarak sisipan limbah plastik dan tebal sampel tanah dengan sisipan limbah plastik optimum menghasilkan peningkatan kuat geser 20% dan CBR 40% serta penurunan berat isi tanah 5% sampai 10%.

Prowell (2000), menjelaskan bahwa serat plastik *polypropylene* dapat dipakai sebagai stabilisator konstruksi perkerasan jalan. Metode yang digunakan adalah mencampur serat plastik *polypropylene* sebesar 0,3% dari jumlah total campuran agregat dan yang perlu diperhatikan bahwa proses pekerjaan konstruksi jalan yang distabilisasi dengan serat plastik *polypropylene* mempunyai persyaratan tertentu yaitu suhu pemanasan material aspal tidak boleh melebihi 146°C karena jika melebihi suhu tersebut plastik akan mengalami leleh sehingga nilai kuat tarik material plastik *polypropylene* hilang.

Konstruksi pekerasan jalan dengan cara panas (Hotmix) yang distabilisasi serat Plastik *polypropylene* harus dikontrol suhu materialnya yaitu antara 143°C - 149°C, sebab pada suhu 160°C serat plastik *polypropylene* sudah meleleh dan akibatnya menambah jumlah pencemaran udara.

Hasan (2013), menyatakan proporsi campuran yang paling optimal pada percobaan kuat tekan beton digunakan serat *polypropylene* 0,60 kg/m³ dan setelah ditambah lagi dosis seratnya maka terjadi penurunan kuat tekan beton. Semakin bertambahnya dosis serat maka akan semakin besar pori-pori yang dihasilkan serat di dalam adukan beton sehingga didapatkan beton yang kurang padat dan kuat tekan yang dihasilkan menjadi lebih kecil. Proporsi campuran serat *polypropylene* pada percobaan kuat tarik belah beton menunjukkan bahwa campuran serat yang optimum untuk kuat tarik belah adalah pada dosis 0,65 kg/m³. yaitu sebesar 3,842 MPa, hal ini terjadi kenaikan 20,44 % dibandingkan dengan beton normalnya.

2.6. Estimasi Konsumsi Energi dan Emisi Menggunakan Metode LCA.

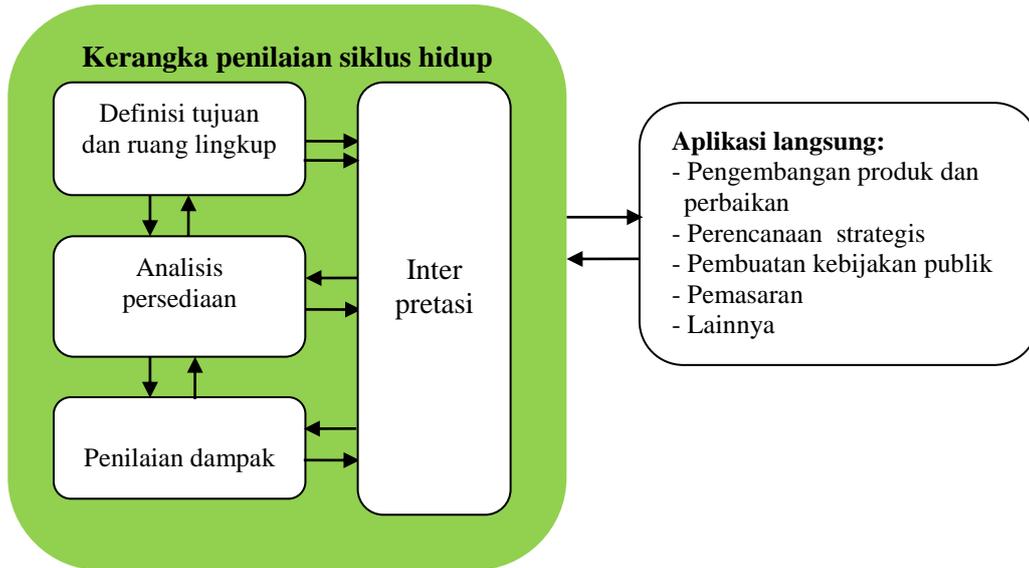
Tumbuhnya kesadaran masyarakat global terhadap perlindungan lingkungan terkait dengan dampak dari kegiatan produksi dan konsumsi menimbulkan minat untuk mengembangkan suatu metode dalam mengurangi dampak tersebut. Salah satu teknik yang dikembangkan untuk tujuan ini adalah *Life Cycle Assessment* (LCA).

Menurut ISO 14040, LCA adalah teknik untuk menilai aspek lingkungan dan dampak potensial yang terkait dengan produk diawali dengan kegiatan : (i)

Kompilasi dan inventarisasi data input maupun output yang relevan dari sistem produk; (ii) Mengevaluasi potensi dampak lingkungan yang terkait dengan data input dan output; (iii) Menafsirkan hasil analisis persediaan dan penilaian dampak dalam kaitannya dengan tujuan penelitian. LCA merupakan salah satu dari beberapa teknik manajemen lingkungan yang digunakan untuk melakukan penilaian risiko, evaluasi kinerja lingkungan, audit lingkungan, dan analisis mengenai dampak lingkungan tetapi tidak mungkin teknik ini yang paling tepat untuk digunakan dalam segala situasi. LCA tidak membahas aspek ekonomi atau aspek sosial dari suatu produk. LCA dapat membantu dalam : (i) Mengidentifikasi peluang untuk meningkatkan aspek lingkungan dari sebuah produk; (ii) Pengambilan keputusan dalam industri, organisasi pemerintah atau non-pemerintah misalnya pada saat perencanaan, penentuan prioritas produk atau proses desain serta saat pelaksanaan desain ulang; (iii) Pemilihan indikator yang relevan dari kinerja lingkungan, termasuk teknik pengukuran; (iv) Marketing misalnya klaim, ecolabel lingkungan atau deklarasi produk lingkungan.

Hasil studi LCA difokuskan pada isu-isu global dan regional walaupun belum tentu dapat diaplikasikan untuk situasi lokal, kondisi lokal tidak mungkin secara memadai diwakili oleh kondisi regional atau global. Keakuratan studi LCA ditentukan oleh aksesibilitas atau ketersediaan data yang relevan, kualitas data, jenis data, agregasi data dan kondisi tempat penelitian.

Penilaian siklus hidup yang meliputi definisi penilaian, interpretasi hasil, ruang lingkup, analisis persediaan, dan dampak seperti digambarkan di bawah ini.



Gambar 2.8. Tahapan pelaksanaan LCA

Sumber : ISO 14040, 1997.

1. Definisi tujuan dan ruang lingkup merupakan langkah awal LCA dengan menetapkan batas, tingkat akurasi, dan waktu penelitian. Hal ini juga mempengaruhi asumsi dan pilihan yang dibuat selama penelitian seperti batas sistem, sumber data dan kategori dampaknya.
2. *Life Cycle Inventory* (LCI) analisis adalah langkah selanjutnya yang relatif obyektif untuk mengumpulkan dan mengkompilasi data masukan seperti bahan baku, energi, dan lainnya serta data keluaran seperti emisi, limbah padat, dalam sistem yang ditetapkan sebelumnya.
3. Penilaian Dampak (LCIA) adalah evaluasi hasil LCI selama indikator dan model karakterisasi akan dipilih untuk setiap kategori dampak. Hasil LCI digunakan untuk menghitung katagori dampak dengan menggunakan ISO14040. Beberapa pilihan subyektif yang dibuat untuk aplikasi tertentu terdiri dari unsur-unsur baik yang wajib maupun opsional meliputi:

(i) Klasifikasi yaitu menetapkan hasil LCI untuk kategori dampak; (ii) Karakterisasi yaitu menghitung hasil indikator dalam setiap kategori dampak; (iii) Normalisasi yaitu menghitung besarnya hasil indikator relatif terhadap referensi informasi; (iv) Pengelompokan kategori dampak menetapkan menjadi kelompok-kelompok tertentu dan menetapkan peringkat; (v) Pembobotan yaitu mengkonversi hasil indikator dan kemungkinan di kategori dampak menggunakan faktor numerik berdasarkan nilai pilihan, sehingga menemukan hasilnya; (vi) Analisa kualitas data yaitu memahami keandalan serta kelemahan data yang digunakan dalam penelitian ini.

Model LCA pada bahan daur ulang perkerasan jalan untuk mengidentifikasi dampak lingkungan bagi industri jasa konstruksi yang bergerak dibidang konstruksi jalan yang mempertimbangkan aspek teknis dan ekonomi agar pekerjaan konstruksi jalan berjalan secara berkelanjutan (Huang Y., 2007).

Untuk memperbaiki kondisi lingkungan akibat proses sebuah produk termasuk konstruksi perkerasan jalan perlu dilakukan pendekatan desain khusus untuk lingkungan (*design for the environment*). Desain ini meliputi penanganan pada produk, proses, bahan baku, energi, dan daur ulang. Pendekatan ini dilakukan pada seluruh daur hidup produk dan pengaruhnya terhadap lingkungan.

Penilaian siklus hidup dapat diartikan sebuah langkah melalui beberapa tahan antara lain : (i) analisis persediaan, (ii) analisis dampak, (iii) analisis perbaikan. Analisis persediaan (*inventory analysis*) menyatakan

masuk jenis, jumlah bahan baku dan energi yang dibutuhkan serta menganalisis pelepasan ke lingkungan yang dihasilkan dalam bentuk residu, padat, cair, dan gas. Analisis persediaan mencakup seluruh siklus hidup produk. Analisis dampak (*impact analysis*) menilai pengaruh lingkungan dari beberapa desain produk. Analisis perbaikan (*improvement analysis*) bertujuan untuk mengurangi dampak lingkungan yang ditunjukkan oleh tahap persediaan dan dampak. Analisis Lingkungan penilaian dampak lingkungan dalam istilah operasional dan keuangan menetapkan tahap untuk langkah terakhir, yaitu mencari cara untuk mengurangi dampak lingkungan dari alternatif-alternatif yang dipertimbangkan atau dianalisis. Perbaikan kinerja lingkungan dari produk dan proses yang ada merupakan tujuan keseluruhan dari sistem pengembalian lingkungan (Nur M., 2010).

Gadja W.J., (2001), menyatakan bahwa konsumsi bahan bakar meningkat akibat bervariasinya bobot kendaraan pada jenis perkerasan. Data menunjukkan bahwa konsumsi bahan bakar mobil tidak dipengaruhi oleh jenis permukaan perkerasan. Jenis perkerasan sangat mempengaruhi konsumsi bahan bakar truk. Berat truk meningkat, konsumsi bahan bakar di perkerasan secara dramatis meningkat dibandingkan dengan konsumsi bahan bakar pada perkerasan beton. Untuk truk kombinasi (semi-Traktor Trailer), jarak tempuh bahan bakar pada perkerasan beton adalah 1 mil per galon (0.43 kilometer per liter) lebih baik dari pada di perkerasan aspal.

Melakukan penilaian siklus hidup lingkungan pada perkerasan beton dan perkerasan aspal akan mencakup dampak lingkungan akibat produksi

bahan konstruksi, transportasi, pemeliharaan, penggantian, dan pembuangan. Aspek-aspek lingkungan termasuk dampak dari menipisnya sumber daya alam, emisi udara, pencemaran air, limbah padat, dan konsumsi energi. Analisis ini sangat kompleks karena dibutuhkan sejumlah data yang dibutuhkan dimulai dari analisis persediaan, daftar sumber daya dan energi yang digunakan, emisi serta limbah. Keuntungan dari siklus hidup lingkungan adalah kemampuan untuk memasukkan semua biaya kepada masyarakat dan penipisan sumber daya alam. Analisis siklus lingkungan hidup termasuk menghitung energi yang dibutuhkan untuk membuat lapis perkerasan beton dan lapis perkerasan aspal.

Rajagopalan N. (2007), menggunakan siklus hidup persediaan untuk menganalisis emisi yang berdampak lingkungan pada pembangunan 3,2 mil (4 jalur jalan raya) di Texas. Proses ini berbasis pendekatan, yang pada dasarnya merupakan pendekatan keseimbangan material dan energi, digunakan dan dibandingkan dengan metode *input-output* penilaian siklus hidup ekonomi (*EIOLCA*) . *EIOLCA* menganalisis dampak emisi terhadap lingkungan atas dasar nilai dolar dari produk atau jasa yang digunakan . Sebuah metode *hybrid* juga digunakan untuk mengukur emisi dari konstruksi jalan. Metode *hybrid* ini merupakan perpanjangan dari *EIOLCA* dan merupakan metode baru yang dikembangkan. Ada 5 jenis emisi udara seperti CO₂ , CO , NO_x , SO₂ , dan PM yang dikuantifikasi tetapi dengan metode lain yang dilakukan dengan menggunakan perbandingan nilai emisi tertinggi CO₂.

Hasil pendekatan berbasis proses mengungkapkan bahwa 18.590 ton CO₂ yang dilepaskan ke lingkungan, sedangkan pendekatan *EIOLCA* memberikan perkiraan 750 ton CO₂ yang dikeluarkan. Penelitian ini menyoroti titik lemah dari kedua metode dan membuat saran untuk meningkatkan yang lebih baik. Analisis sensitivitas memberikan perkiraan dampak dari nilai input yang berbeda pada output. Hasil penelitian menunjukkan bahwa faktor emisi yang digunakan untuk menghitung emisi mempengaruhi *output*. Penelitian ini melakukan penilaian persediaan pada studi kasus dan membandingkannya dengan metode yang lain menunjukkan bahwa meskipun *EIOLCA* adalah metode yang diterima secara luas. Untuk kasus individual, dapat digunakan kombinasi pendekatan berbasis proses dan *EIOLCA*.

Tabel 2.9. Dampak lingkungan konstruksi perkerasan aspal

Masukan lingkungan	Sumber daya alam	Batu pecah (agregat kasar), Kerikil / Pasir (agregat halus), Limestone filler, aspal (perkerasan, aspal busa, emulsi), Bahan daur ulang (RAP, kaca, plastik, karet ban, kerak baja, air.
	Sumber energi	Listrik, gas alam, produk minyak bumi (LPG, diesel, minyak pelumas, Batubara, energi terbarukan (bahan bakar biomassa, nuklir, air, angin.
Keluaran lingkungan	Emisi ke udara	SO ₂ , NO _x (total of NO and NO ₂), CO, CO ₂ , HC (hidrokarbon), CH ₄ , NMVOC (non-methane VOC), N ₂ O, Partikulat, NH ₃ , Logam berat.

Dibuang ke air	BOD (biological oxygen demand), COD (chemical oxygen demand), Pospat, Nitrat, Nitrogen total, HC (hydrocarbons), Minyak, Logam berat, Chloride, Sulpat.
Produk dan limbah	Lapis perkerasan aspal, limbah padat (beracun, berbahaya)

Sumber : Huang Y., 2007.

Transportasi berdampak pada faktor-faktor ekonomi dan lingkungan sosial serta mewakili 10 % dari produk domestik bruto dunia. Kegiatan konstruksi perkerasan jalan termasuk bandara sebagian besar telah menggunakan 22% dari konsumsi energi global, 25% dari bahan bakar fosil dan 30% menghasilkan polusi udara global yaitu gas rumah kaca.

Upaya untuk mewujudkan konstruksi perkerasan jalan berkelanjutan yang aman, efisien dan ramah lingkungan untuk memenuhi kebutuhan transportasi saat ini tanpa mengabaikan kemampuan untuk memenuhi kebutuhan tersebut di masa depan.

Salah satu teknologi dapat diterapkan untuk konstruksi perkerasan berkelanjutan yaitu beralih ke daur ulang perkerasan khususnya berbahan aspal (Resmi, 2011).

Milachowski (2011), menyatakan potensi dampak lingkungan dapat dikurangi dengan mengoptimalkan produksi bahan konstruksi. Dalam kasus jalan raya beton , penurunan kandungan klinker semen akan mengurangi dampak lingkungan hingga 21 %, dalam kasus jalan raya aspal, penggunaan bahan bakar sekunder dan penggunaan kembali aspal juga akan mengurangi

dampak lingkungan. evaluasi masa kerja 30 tahun menunjukkan bahwa dampak lingkungan yang potensial karena beban lalu lintas adalah 100 kali lebih besar daripada pemeliharaan konstruksi. Penurunan konsumsi bahan bakar sekitar 10 % dapat dicapai dengan perbaikan tekstur permukaan perkerasan atau kerataan serta kekakuan jalan .

Aspek-aspek lingkungan termasuk dampak dari menipisnya sumber daya alam, emisi udara, pencemaran air, limbah padat, dan konsumsi energi. Analisis ini sangat kompleks karena dibutuhkan sejumlah data yang dibutuhkan dimulai dari analisis persediaan, daftar sumber daya dan energi yang digunakan, emisi serta limbah.

Keuntungan dari siklus hidup lingkungan adalah kemampuan untuk memasukkan semua biaya yang dapat dibebankan kepada masyarakat berkaitan dengan penipisan sumber daya alam, termasuk menghitung energi yang dibutuhkan untuk membuat lapis perkerasan beton dan aspal (Gadja, 2001).

Gschosser F. (2011), menganalisis potensi dampak lingkungan dan biaya dengan menggunakan indikator analisis siklus hidup yang dilakukan pada konstruksi perkerasan jalan di Swiss. Penelitian siklus hidup ini fokus pada potensi lingkungan, pengaruh ekonomi pada proses pembangunan jalan baru dan selama masa pemeliharaan.

Hasil penelitian ini mendorong pelaku jasa dibidang konstruksi jalan untuk memanfaatkan bahan konstruksi yang mempunyai dampak minim terhadap lingkungan dan analisis teknis yang baik sehingga menghasilkan keuntungan dalam pelaksanaan pekerjaan. Rekomendasi untuk penelitian selanjutnya fokus

pada produk bahan perkerasan jalan dan menggunakan metodologi LCA ke dalam sistem manajemen perkerasan jalan.

Ada beberapa kesamaan antara aspek ekonomi dan lingkungan dari pekerjaan konstruksi jalan. Bahwa sebagian besar dampak ekonomi dan lingkungan terkena pada pengguna jalan, hal ini perlu mendapat perhatian ketika menilai dalam menentukan pekerjaan perawatan jalan dalam jangka waktu lama untuk mengurangi dampak lingkungan bagi pengguna jalan.

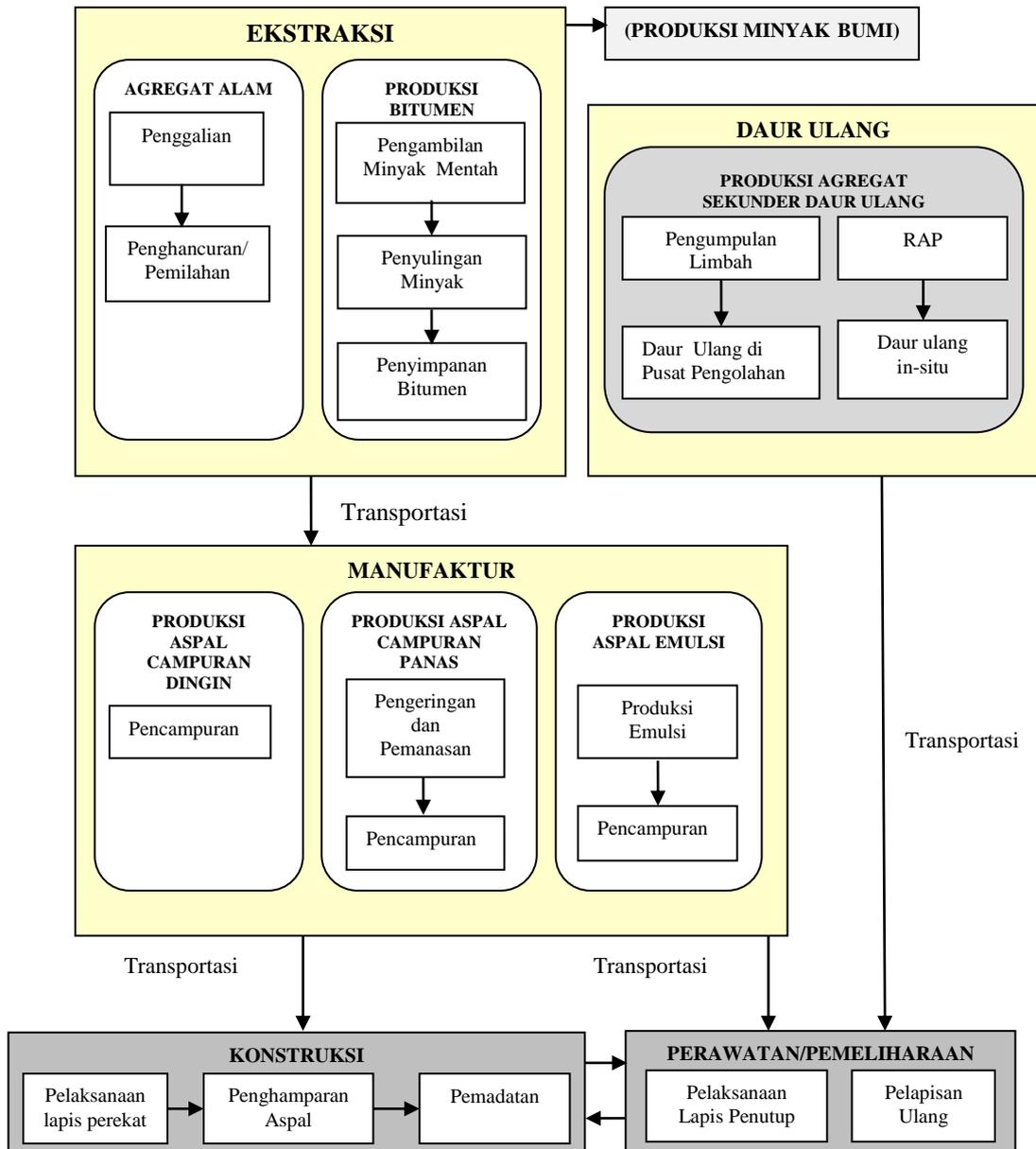
Penilaian siklus hidup yang didasarkan pada perbandingan antara daur ulang dan campuran aspal tradisional ditinjau dari emisi yang dihasilkan, dinyatakan dalam kg CO₂e emisi/ton. Teknologi daur ulang perkerasan aspal menunjukkan penurunan emisi yang signifikan pada kegiatan proyek jalan (Nicuta , 2011).

Menurut Bahia (2012), penilaian siklus hidup dapat digunakan untuk menganalisa konsumsi energi dan biaya bahan aspal sebagai pengikat perkerasan jalan.

Data dianalisis untuk menghasilkan besarnya kebutuhan energi pada perkerasan jalan diinput per satuan volume aspal dengan tujuan untuk mencapai desain konstruksi jalan yang efisien energi, ekonomis dan tahan lama.

Bahia (2009), membagi beberapa tahap dalam penilaian siklus hidup dalam pelaksanaan pengaspalan jalan yang dimulai pengambilan bahan aspal, proses di pabrik, digunakan dalam konstruksi dan sampai pada tahap pemeliharaan seperti gambar skema di bawah ini.

Untuk penelitian selanjutnya akan digunakan skema daur ulang perkerasan jalan sehingga dapat diketahui konsumsi energi dan emisi yang dihasilkan serta pada akhirnya dapat mengurangi dampak negatif lingkungan akibat kegiatan konstruksi perkerasan jalan.



Gambar 2.9. Siklus hidup material perkerasan aspal
 Sumber : Bahia dan Miller, 2009.

Pekerjaan konstruksi jalan yang menggunakan aspal panas (*hotmix asphalt*) di duga menghasilkan emisi gas rumah kaca. Hal ini terjadi karena adanya pembakaran aspal yang merupakan produk pengolahan minyak bumi berasal dari bahan fosil sehingga dari pembakaran aspal tersebut menghasilkan reaksi senyawa hidrokarbon $C_xH_y + O_2 \rightarrow CO_2 + H_2O$.

Wirahadikusumah (2012), menyatakan untuk melakukan perhitungan estimasi konsumsi dan energi GRK melalui beberapa tahap dengan batasan bahwa kajian aktifitas langsung pada sektor jasa konstruksi yaitu: (i) Tahap produksi campuran aspal panas; (ii) Tahap transportasi material; (iii) Tahap pelaksanaan pekerjaan pengaspalan.

Hasil perhitungan dan penelitian menyatakan bahwa proses pengeringan agregat memerlukan energi sekitar 68% dan mengeluarkan emisi 70-75% dari seluruh tahapan.

Penelitian selanjutnya dapat dilakukan berbagai skenario metoda pekerjaan pengaspalan jalan sehingga dapat ditemukan metoda yang optimal untuk meminimasi dampak lingkungan yang membahayakan manusia.

Komponen gas rumah kaca yang paling dominan pada pembakaran bahan bakar adalah gas karbon dioksida (CO₂), peralatan yang digunakan pada pekerjaan konstruksi jalan menggunakan bahan bakar solar (*diesel fuel*) mengandung karbon (86,4%), hydrogen (12,7%), sulfur (0,4-1,5%), oksigen dan nitrogen (0,2%), asumsi kandungan karbon pada bahan bakar diesel 727,0 g C/liter.

Untuk menghitung estimasi penggunaan energi dan emisi berdasarkan faktor emisi gas rumah kaca (CO₂) pada pelaksanaan pekerjaan pengaspalan jalan yang berpedoman pada *Intergovernmental Panel on Climate Change* (IPCC) tahun 2006 adalah sebagai berikut :

$$Emisi\ GRK\ (kgCO_2/ton) = \frac{Konsumsi\ Energi\ (MJ) \times Factor\ Emisi\ (kgCO_2/MJ)}{Total\ produksi\ (ton)} \dots\dots\dots(2.3)$$

$$Konsumsi\ Energi\ (MJ/ton) = \frac{Konsumsi\ Bahan\ Bakar\ (liter) \times Calorific\ Value\ (MJ/liter)}{Total\ produksi\ (ton)} \dots\dots(2.4)$$

Emisi GRK merupakan gas yang berasal dari proses pembakaran bahan bakar menghasilkan (CO₂), metana (CH₄), dan dinitro oksida (N₂O). Pada proses pembakaran bahan bakar minyak semua karbon yang terkandung di dalamnya dikonversi mendekati (99) menjadi (CO₂).

Faktor emisi adalah nilai yang menunjukkan jumlah polutan yang dilepaskan ke atmosfer dari sumbernya dan dinyatakan dalam satuan berat polutan per satuan berat, volume, jarak atau jumlah waktu kegiatan yang mengemisikan polutan.

Calorific Value adalah kalor yang dihasilkan dari proses pembakaran setiap satuan massa bahan bakar dan dinyatakan dalam satuan energi dibagi satuan massa bahan bakar yang biasanya digunakan satuan *Gigajoule* (GJ) per *megagram* (Mg).

Faktor emisi dan *Colorific Value* digunakan untuk menghitung konversi energi dan emisi gas rumah kaca yang berasal dari penggunaan bahan bakar minyak mentah dan batu bara sehingga dapat diestimasi dampak lingkungan yang terjadi akibat penggunaan bahan bakar tersebut.

Tabel 2.10. Faktor konversi energi dan faktor emisi bahan bakar (IPCC, 2006)

Jenis Bahan Bakar	Density (kg/ltr)	Calorific Value		Emission Factor	
		(GJ/Mg)	(MJ/ltr)	(kg CO ₂ /GJ)	(kg CO ₂ /ltr)
Minyak Mentah (Crude Oil)	0.847	42.30	35.83	73.30	2.63
Solar (Diesel fuel)	0.837	43.00	35.99	74.10	2.67
Batubara (Bituminous Coal)		25.80		94.60	

Sumber : Wirahadikusumah, 2012.

2.7. Biaya Internal dan Eksternal Pada Pelaksanaan CTRB

2.7.1. Biaya internal Pada Pelaksanaan CTRB

Biaya internal yang berasal dari penyediaan (konstruksi, pengelolaan) dan penggunaan infrastruktur transportasi. Biaya ini harus diperoleh kembali dari pengguna infrastruktur atau dari masyarakat. Biaya internal merupakan landasan untuk semua keputusan atas pasar transportasi. Biaya tersebut menentukan permintaan mobilitas individu dan penyediaan transportasi melalui keputusan penyewaan dari penyedia transportasi atau perhitungan kelayakan ekonomi dari proyek-proyek infrastruktur dan sebagainya (Schwaab J., dan S Thielmann S., 2001)

Biaya internal yang dikeluarkan pada pelaksanaan lapis perkerasan jalan dihitung menggunakan analisis harga satuan yang ditetapkan oleh Direktorat Jenderal Bina Marga Departemen Pekerjaan Umum.

Pekerjaan lapis perkerasan jalan pada umumnya mengikuti spesifikasi teknik untuk dokumen kontrak pekerjaan yang dikeluarkan oleh Direktorat Jenderal Bina Marga, yaitu Spesifikasi Umum dan Spesifikasi Khusus. Spesifikasi tersebut sebagai dasar untuk menyusun Analisis Harga Satuan Pekerjaan (AHSP).

Spesifikasi umum pekerjaan konstruksi jalan merupakan bagian dari dokumen kontrak pekerjaan, digunakan sebagai ketentuan teknis untuk mencapai suatu produk pekerjaan mulai dari proses persiapan, metode pelaksanaan, bahan, peralatan, pengendalian mutu, dan tata cara pembayaran. Penerapan spesifikasi ini dilakukan selama periode pelaksanaan pekerjaan konstruksi, dan sebagai dasar penentuan pembayaran, serta tidak untuk digunakan pada paska periode kontrak dan tidak untuk kegiatan paska audit (*post-audit*).

Spesifikasi khusus merupakan item pekerjaan yang tidak terdapat dalam spesifikasi umum. Spesifikasi ini diperlukan karena tuntutan pekerjaan yang bersifat spesifik sehingga disusun spesifikasi yang bersifat khusus. Spesifikasi khusus dilengkapi dengan analisis harga satuan pekerjaan (AHSP). AHSP tersebut akan menghasilkan harga yang tidak sama, tergantung pada asumsi dan koefisien yang digunakan. Spesifikasi khusus lainnya yang belum dilengkapi dengan AHSP dapat disusun tersendiri berdasarkan spesifikasi tersebut dan rumus-rumus yang tersedia.

2.7.2. Biaya Eksternal Pada Pelaksanaan CTRB

Biaya eksternal adalah biaya transportasi yang bertambah pada masyarakat selain daripada mereka yang terlibat dalam kegiatan transportasi. Biaya tersebut berasal dari sebagian besar efek samping dari transportasi, seperti kemacetan, kecelakaan, emisi dan polusi, kebisingan dan faktor estetis yang semuanya mempengaruhi masyarakat dan/atau generasi yang akan datang secara negatif. Biaya-biaya yang demikian jarang membebani pengguna jalan. Bahkan negara-negara yang telah menerapkan “prinsip pengguna yang membayar” (setiap pengguna transportasi membayar untuk semua biaya yang ia timbulkan), pada dasarnya berlakunya hanya untuk biaya pribadi. Akibatnya, transportasi jalan menjadi terlalu murah dan penggunaannya menjadi tidak efisien.

Dalam usaha mematuhi prinsip ‘pembuat polusi membayar’ dimana si pencemar diminta untuk menutupi seluruh biaya yang ditimbulkan oleh polusi tersebut dan dalam usaha membentuk sistem transportasi perkotaan yang berkelanjutan dan efisien, meminimalisir eksternalitas sangat diperlukan. Kita perlu meminimalisir atau mengeliminir kondisi eksternal karena dalam pasar ekonomi pengguna transportasi mendasarkan keputusan mereka (misalnya bagaimana, kapan dan dimana melakukan perjalanan) pada biaya dari berbagai pilihan. Jika harga dari berbagai pilihan (misal mengadakan perjalanan dengan mobil pribadi) menaksir terlalu rendah biaya-biaya seperti polusi udara, kepadatan lalu lintas, infrastruktur jalan, pemanasan global dan lain-lain, maka

alokasi sumberdaya dalam sistem transportasi akan menjadi tidak efisien dan tidak adil.

Meski struktur biaya dari perjalanan dalam kota bervariasi di kota-kota yang berbeda, secara umum transportasi jalan dengan kendaraan bermotor pribadi saat ini terlalu murah bagi pengendara. Bagian besar dari biaya perjalanan seperti itu dibebankan pada komunitas yang lebih luas.

Cara terbaik mengurangi eksternalitas ini adalah melalui pendekatan berbasis harga yang bertujuan meminta pengguna transportasi untuk membayar penuh biaya (swasta, lingkungan, orang lain) perjalanan mereka sendiri (Schwaab J., dan S Thielmann S., 2001).

Dalam perusahaan dibutuhkan bahan bakar, tenaga kerja, dan peralatan untuk membuat sebuah produk. Biaya untuk kebutuhan ini disebut biaya pribadi atau biaya internal yaitu harga yang harus dibayar oleh perusahaan dalam rangka memproduksi listrik. Namun ternyata dalam membuat sebuah produk juga melibatkan biaya-biaya eksternal dimana perusahaan tidak membayarnya. Biaya ini misalnya muncul sebagai biaya pembersihan rumah di sekitar perusahaan yang terkena jelaga pembakaran atau biaya berobat masyarakat akibat menghirup asap dan udara yang polusi di sekitar perusahaan. Jadi jika dilihat dari sudut pandang masyarakat secara keseluruhan maka biaya untuk menghasilkan sebuah produk tidak hanya biaya internal saja tetapi juga mencakup biaya eksternal. Jumlah total biaya untuk menghasilkan sebuah produk yaitu biaya internal ditambah dengan biaya eksternal disebut biaya

sosial yaitu biaya yang harus dibayar masyarakat untuk membuat sebuah produk (Susilawati I., 2010).

Aktivitas transportasi memiliki biaya transportasi yang harus ditanggung oleh penyedia jasa angkutan. Biaya ini adalah biaya internal transportasi yang timbul oleh angkutan (moda) untuk mengangkut barang ke tujuan. Biaya ini adalah biaya yang terlihat langsung dan merupakan biaya yang berpengaruh dalam pengambilan keputusan transportasi. Namun selain menimbulkan biaya internal, aktivitas transportasi domestik juga menimbulkan biaya eksternal.

Internalisasi biaya eksternal merupakan digunakan untuk mengetahui signifikansi biaya eksternal tersebut terhadap unit biaya transportasi domestik, mengingat beberapa jenis BBM masih disubsidi. Internalisasi ini akan menyebabkan rata-rata kenaikan unit biaya transportasi domestik (Pratiwi I.P.N., 2013).