

2. TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Perkerasan Jalan

Perkerasan jalan merupakan struktur konstruksi tanah yang terdiri atas beberapa lapisan perkerasan yang telah dipadatkan di atas tanah dasar (*subgrade*), yang berfungsi untuk menopang beban lalu lintas yang diterima lapis permukaan dan mendistribusikannya ke lapisan tanah dasar. Dengan adanya perkerasan jalan, diharapkan tanah dasar memiliki daya dukung tanah yang mencukupi untuk menerima beban lalu lintas dari lapisan di atasnya.

2.2 Jenis Perkerasan Jalan

Berdasarkan bahan pengikatnya, jenis perkerasan jalan dibagi menjadi tiga jenis perkerasan, antara lain:

1. Perkerasan kaku (*rigid pavement*)
2. Perkerasan lentur (*flexible pavement*)
3. Perkerasan komposit (*composite pavement*)

2.2.1 Perkerasan Kaku

Perkerasan kaku merupakan salah satu jenis perkerasan tanah dimana semen (*portland cement*) digunakan sebagai bahan pengikat pada lapisan permukaan. Dapat disebut perkerasan kaku karena memiliki nilai modulus elastis (E) yang cukup tinggi ($+250.000 \text{ kg/m}^2$). Secara struktural, perkerasan kaku berupa lapisan permukaan beton dengan mutu tinggi yang mengakibatkan dua lapisan yang berada tepat di atas tanah dasar seperti *base course* dan *sub base course* tidak terlalu berperan dalam struktur tanah. Peranan dari beton dengan mutu tinggi juga berakibat pada daya dukung tanah menjadi kurang signifikan. Dengan sifat kaku yang dimiliki membuat jenis perkerasan ini cocok digunakan pada jalan dengan lalu lintas yang padat. Selain itu, perkerasan kaku memiliki keuntungan dengan umur perkerasan yang tahan lama sehingga biaya perawatan menjadi lebih sedikit.

2.2.2 Perkerasan Lentur

Perkerasan lentur merupakan perkerasan yang menggunakan aspal sebagai bahan pengikat. Konstruksi perkerasan lentur terdiri dari lapisan-lapisan yang diletakkan di atas tanah

dasar yang telah dipadatkan. Lapisan-lapisan tersebut berfungsi untuk menerima beban lalu lintas dan menyebarkannya ke lapisan di bawahnya. Lapisan-lapisan tersebut terdiri dari:

1. Lapisan Permukaan (*Surface Course*)

Merupakan lapisan yang terletak paling atas, berfungsi antara lain sebagai lapisan perkerasan penahan beban roda, lapis yang menyebarkan beban ke lapis bawah, lapisan kedap air, sehingga air hujan yang jatuh tidak meresap ke lapisan bawahnya dan melemahkan lapisan tersebut. Selain itu, lapisan ini juga berfungsi sebagai lapis aus (*wearing course*), lapisan yang langsung menderita gesekan akibat rem kendaraan sehingga menjadi aus.

2. Lapisan Pondasi Atas (*Base Course*)

Merupakan lapisan perkerasan yang terletak di antara lapis pondasi bawah dan lapis permukaan. Lapisan ini memiliki fungsi menahan gaya lintang dari beban roda dan menyebarkannya ke lapisan di bawahnya. Lapisan pondasi atas (*Base Course*) juga memiliki fungsi sebagai lapisan peresapan untuk lapisan pondasi bawah dan bantalan terhadap lapisan permukaan.

2.2.3 Perkerasan Komposit

Perkerasan komposit (*composite pavement*) merupakan jenis perkerasan yang menggabungkan dua jenis perkerasan sekaligus yaitu perkerasan kaku dengan perkerasan lentur. Dalam perkerasan ini, semen dan aspal digunakan secara bersamaan sebagai bahan pengikat. Perbedaannya adalah jika semen digunakan pada lapisan pondasi sedangkan aspal digunakan pada lapisan permukaan perkerasan.

2.3 Lapisan Laston AC-BC (*Binder Course*) atau Lapis Antara

Lapisan perkerasan merupakan lapisan yang berada di atas lapis pondasi. Berdasarkan tingkat lapisannya, lapisan perkerasan terdiri atas tiga lapisan yaitu: AC-WC (*wearing course*), AC-BC (*binder course*), dan AC-Base (*base course*). Lapisan laston AC-BC (*Binder Course*) merupakan lapisan yang berada di antara lapis permukaan dan lapis dasar yang berperan dalam menyebarkan beban dari lapis permukaan ke lapisan yang berada di bawahnya. Pada dasarnya, lapisan AC-BC merupakan lapisan yang tidak membutuhkan kualitas sebaik lapisan laston AC-WC.

2.4 Material Campuran Perkerasan Lentur

Dalam perkerasan lentur, terdapat dua material yang digunakan dalam pembuatan campurannya yaitu agregat sebagai material utama dan aspal sebagai bahan pengikat agregat dalam campuran. Dalam penelitian ini digunakan RAP (*Reclaimed Asphalt Pavement*) sebagai pengganti agregat alam, CFBC *bottom ash* sebagai material pengganti agregat halus, dan CFBC *fly ash* sebagai bahan aditif.

2.4.1 Aspal

Aspal atau bitumen adalah bahan hidro karbon berwarna hitam-kecoklatan dan memiliki sifat rekat (*adhesive*), tahan terhadap air, dan viskoelastik. Aspal merupakan hasil pemisahan minyak bumi. Fungsi aspal adalah sebagai pengikat agregat agar terbentuk suatu struktur yang kohesif. Aspal sifatnya dibedakan berdasarkan suhu. Pada suhu yang tinggi, aspal berbentuk cair sedangkan pada suhu yang dingin aspal berbentuk padat. Pada penelitian ini jenis aspal yang digunakan adalah aspal penetrasi 60-70.

2.4.2 Agregat

Agregat adalah komponen padat dan keras dengan ukuran yang bervariasi yang merupakan material utama dalam konstruksi perkerasan jalan dan berfungsi sebagai penahan beban serta mengisi rongga (Yamin, 2013). Agregat dapat digunakan pada seluruh jenis lapisan perkerasan jalan kecuali pada lapisan tanah dasar dimana pada umumnya agregat yang digunakan terdiri atas batu bulat, batu pecah, abu batu, dan pasir. Karakteristik agregat yang baik berpengaruh terhadap daya dukung perkerasan jalan karena sekitar 90% bahan pembentuk lapisan perkerasan berupa agregat. Pada penelitian yang dilakukan oleh (Pratama, 2021), agregat yang berbentuk bersudut dan memiliki banyak bidang pecah memberikan *internal friction* dan *interlocking* yang baik antar partikel agregat. Sedangkan agregat yang berbentuk pipih dan panjang kurang memberikan *internal friction* dan *interlocking* yang baik antar partikel. Gaya *internal friction* dan *interlocking* yang baik dapat meningkatkan kestabilan sehingga campuran perkerasan jalan menjadi lebih tahan lama. Berdasarkan ukuran partikelnya, agregat dibedakan menjadi tiga fraksi agregat, antara lain:

1. Agregat Kasar

Partikel agregat kasar berasal dari proses disintegrasi alami yang terjadi pada batuan yang hasilnya berupa batu pecah/kerikil keras dan tidak berpori, yang tertahan pada saringan No. 4 (2,36 mm).

2. Agregat Halus

Partikel agregat halus merupakan partikel agregat hasil disintegrasi alami dan buatan yang dihasilkan dari alat pemecah batuan, yang lolos dari saringan No. 4 (4,75 mm) – No. 200 (0,075 mm).

3. Bahan Pengisi (*Filler*)

Bahan pengisi pada campuran perkerasan jalan biasanya menggunakan partikel seperti pasir ataupun semen yang telah lolos saringan No. 200 (0,075 mm).

2.4.3 Reclaimed Asphalt Pavement

Reclaimed Asphalt adalah material hasil pengupasan dan atau pemrosesan ulang perkerasan yang terdiri atas aspal dan agregat dengan menggunakan *cold milling machine* (Widayanti et al., 2017). RAP mulai dipergunakan sebagai material dalam industri konstruksi di latar belakang akibat limbah/bahan buangan hasil pengerukkan aspal yang telah rusak dikumpulkan hanya menjadi bahan urugan saja. Hadirnya RAP sebagai material perkerasan jalan berdampak positif terhadap kelestarian sumber daya alam, lingkungan, dan ekonomi negara khususnya dalam bidang infrastruktur. Meskipun telah berhasil digunakan sebagai material pengganti agregat seperti pada penelitian (Noviarti et al., 2019; Permadi et al., 2015; Twidi et al., 2018), RAP diperlukan perbaikan *properties* agar lapisan perkerasan dengan menggunakan RAP memiliki kualitas yang lebih baik dari campuran aspal konvensional. Mencampurkan RAP dengan material baru juga dapat berdampak positif pada campuran lapisan perkerasan seperti menghasilkan material yang lebih baik dari kondisi aslinya dan dapat memperbaiki umur teknis lapisan.

Sebelum mengaplikasikan RAP pada lapis perkerasan jalan perlu memperhatikan karakteristik dari RAP sebagai material pengganti agregat alam dapat dilihat dari gradasi material, dan sifat-sifat campuran untuk penggunaan RAP pada lapisan perkerasan jalan (Spesifikasi Umum 2018 Untuk Pekerjaan Konstruksi Jalan Dan Jembatan (Revisi 2), 2020). Karakteristik gradasi dapat dilihat kelayakannya dengan dilakukan uji analisa saringan dengan menggunakan ayakan berukuran 50 mm, 25,0 mm, 19 mm, 12,5 mm, 9,50 mm, 4,75 mm, 2,36 mm, 1,18 mm, 0,6 mm, 0,3 mm, 0,15 mm, dan 0,075 mm.

Berdasarkan penelitian yang dilakukan oleh (Valdés et al., 2011) dan (Alwetaishi et al., 2019), didapatkan nilai pengujian RAP proporsi tinggi dalam campuran aspal yaitu RAP dengan kadar 40% dan 60%. Hasilnya menunjukkan bahwa proporsi RAP dalam campuran aspal hingga 60% memungkinkan untuk dilakukan pembuatan benda uji. Bersamaan dengan tingginya

proporsi RAP dalam campuran beraspal (>50%), peremajaan atau *rejuvenation* merupakan suatu keharusan karena adanya potensi penuaan dalam campuran RAP (Imaninasab et al., 2022).

2.4.4 CFBC *Bottom ash*

Bottom ash merupakan salah satu limbah dari proses pembakaran batu bara pada pembangkit tenaga yang mempunyai ukuran partikel lebih besar dan lebih berat dari pada *fly ash*, sehingga *bottom ash* akan jatuh pada dasar tungku pembakaran (*boiler*) dan terkumpul pada penampung debu (*ash hopper*) lalu dikeluarkan dari tungku dengan cara disemprot dengan air untuk kemudian dibuang atau dipakai sebagai bahan tambahan pada perkerasan jalan (Santoso et al., 2003).

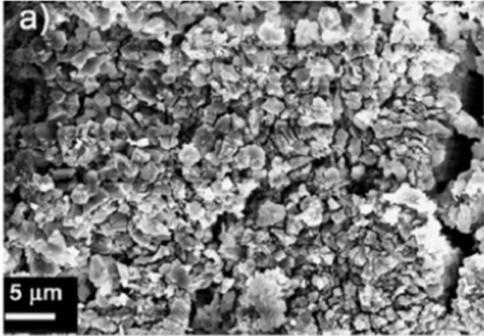
Karakteristik fisik dari *bottom ash* biasanya dipengaruhi oleh jenis batu bara yang digunakan di PLTU. Selain itu suhu pembakaran serta proses pembakaran juga mempengaruhi karakteristik fisik *bottom ash*. Secara umum, ukuran partikel *bottom ash* lebih besar dibandingkan ukuran partikel *fly ash*. *Bottom ash* memiliki bentuk partikel yang tidak beraturan, kasar, dan memiliki pori. Sebagai akibat dari ukuran dan bentuk partikel *bottom ash* yang tidak beraturan, maka jika digunakan dalam beton akan membutuhkan banyak air. Kadar penyerapan air dari *bottom ash* juga bervariasi, mulai dari 4.06% hingga 28.9% (Hamada et al., 2022).



Gambar 2.1 Bentuk Partikel *Bottom ash*

Karakteristik kimia dari *bottom ash* dipengaruhi dari jenis batu bara dan proses pembakaran di PLTU. Komposisi kimia *bottom ash* bisa didapatkan melalui pengujian *x-ray fluorescence* (XRF) maupun pengujian *x-ray diffraction* (XRD). Berdasarkan penelitian yang dilakukan oleh (Oruji et al., 2017), diperoleh komposisi kimia dari CFBC *bottom ash* yang memiliki

kandungan SiO_2 dan Al_2O_3 yang tinggi yakni sebesar 58,7% dan 20,1%. Kandungan senyawa kimia dari *bottom ash berjenis* CFBC dapat dilihat pada Tabel 2.1.



Gambar 2.2 Foto SEM *Bottom Ash* Berjenis CFBC

Sumber: (Chindapasirt & Rattanasak, 2009)

Tabel 2.1

Kandungan Senyawa Kimia *Bottom Ash* berjenis CFBC

No	Chemical Composition	(%wt)
1	SiO_2	58,7
2	Al_2O_3	20,1
3	Fe_2O_3	6,2
4	CaO	9,5
5	MgO	1,6
6	SO_3	0,4
7	Na_2O	0,1
8	K_2O	1,0
9	LOI	0,8

Sumber: (Oruji et al., 2017)

Tingginya kadar SiO_2 dan Al_2O_3 dalam *bottom ash* memberikan beberapa keuntungan. SiO_2 merupakan komponen utama dalam *bottom ash* berjenis CFBC dan memiliki sifat reaktif yang baik terhadap bahan pengikat seperti aspal. Dengan kadar SiO_2 yang tinggi, *bottom ash* dapat berinteraksi dengan bahan pengikat dengan kuat, yang pada gilirannya meningkatkan ikatan antarpartikel dalam campuran aspal. Selain itu, SiO_2 juga memiliki kemampuan baik dalam mengisi rongga-rongga kecil dalam campuran, meningkatkan kepadatan dan kekuatan campuran secara keseluruhan. Al_2O_3 juga memberikan kontribusi penting dalam karakteristik CFBC *bottom ash*. Al_2O_3 yang tahan terhadap asam dan suhu tinggi dapat memberikan ketahanan yang lebih baik terhadap korosi dan deformasi dalam campuran konstruksi.

Kehadiran Al_2O_3 juga memberikan stabilitas termal pada campuran sehingga mampu menahan perubahan suhu yang ekstrem.

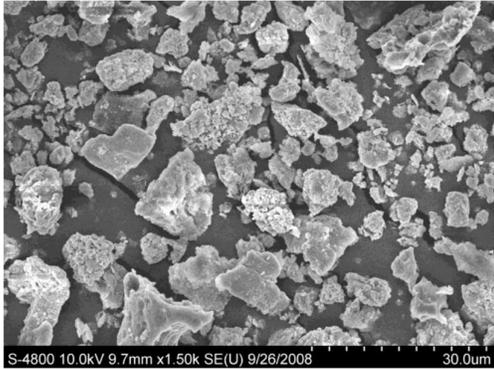
Dengan kandungan SiO_2 dan Al_2O_3 yang tinggi, CFBC *bottom ash* dapat digunakan sebagai substitusi atau pengganti sebagian agregat alam dalam berbagai aplikasi konstruksi. Penggunaan *bottom ash* ini dapat meningkatkan kekuatan, stabilitas, dan ketahanan campuran terhadap beban dan kondisi lingkungan. Selain itu, penggunaan CFBC *bottom ash* juga berkontribusi pada pengelolaan limbah industri dengan memanfaatkan sisa produksi yang sebelumnya dianggap sebagai limbah.

2.4.5 CFBC Fly Ash

Fly ash atau abu terbang merupakan limbah yang dihasilkan dari pembakaran batu bara selain *bottom ash*, di dalam suatu ruang bakar kemudian dikumpulkan dengan *electrostatic precipitator* melalui silo-silo yang selanjutnya di buang ke tempat penimbunan (Cassiopea, 2014). *Fly ash* mempunyai sifat pozzolan dan memiliki kadar semen yang tinggi. Kandungan kimia *fly ash* menurut (Santoso et al., 2003) mengandung silika (SiO_2), besi oksida (Fe_2O_3), aluminium oksida (Al_2O_3), kalium oksida (CaO), magnesium oksida (MgO), dan sulfat (SO_4). Berdasarkan penelitian yang dilakukan oleh (Sugiyanto et al., 2015), penggunaan *fly ash* dalam konstruksi perkerasan jalan dapat menurunkan biaya konstruksi 10 hingga 20 persen.

Terdapat dua jenis *fly ash* berdasarkan jenis pembakarannya yaitu *Pulverized Coal Combustion (PCC)* dan *Circulating Fluidized Bed Combustion (CFBC)*. Suhu pembakaran *fly ash* CFBC lebih rendah dibandingkan *fly ash* PCC yaitu (800-900°C) sedangkan *fly ash* PCC (1400-1700°C). *Fly ash* berjenis CFBC memiliki karakteristik bentuk yang kasar dan tidak beraturan seperti pada ditunjukkan pada Gambar 2.2.

Di Indonesia, penggunaan *fly ash* jenis CFBC masih sangat jarang digunakan. Sebagai contoh pada produksi semen yang umumnya menggunakan *fly ash* berjenis PCC karena bentuknya yang bulat dan memiliki sifat reaktifitas yang tinggi. Berdasarkan penelitian yang dilakukan (Li et al., 2009), *fly ash* berjenis CFBC dapat dimanfaatkan sebagai bahan alternatif *filler* pengganti *mineral powder* yang banyak digunakan pada aspal beton. Dalam penelitian ini, *fly ash* berjenis CFBC terbukti dapat meningkatkan durabilitas dan kekuatan pada aspal beton karena memiliki kandungan kapur yang cukup tinggi. Dari penelitian yang dilakukan oleh (Chandra & Tanjones, 2020), pengujian kandungan senyawa kimia dari *fly ash* berjenis CFBC adalah seperti yang terlampir pada Tabel 2.1.



Gambar 2.3 Foto SEM *Fly Ash* Berjenis CFBC

Sumber: (Stevens et al., 2009)

Tabel 2.2

Kandungan Senyawa Kimia *Fly Ash* berjenis CFBC yang Diperoleh dari PLTU Ngoro

No	Chemical Composition	(%wt)	No	Chemical Composition	(%wt)
1	SiO ₂	46,3	7	K ₂ O	0,92
2	Al ₂ O ₃	13,2	8	TiO ₂	0,67
3	Fe ₂ O ₃	17,92	9	MnO ₂	0,34
4	CaO	10,72	10	Cr ₂ O ₃	0,02
5	MgO	6,57	11	SO ₃	2,52
6	Na ₂ O	0,38	12	SiO ₂ + Al ₂ O ₃ + Fe ₂ O ₃	77,42

Sumber: (Chandra & Tanjones, 2020)

Berdasarkan data yang tercantum dalam Tabel 2.1, kandungan SiO₂ + Al₂O₃ + Fe₂O₃ dalam *fly ash* jenis CFBC yang diperoleh dari PLTU Ngoro mencapai 77,42%. Menurut standar ASTM C618-05, *fly ash* ini diklasifikasikan sebagai *fly ash* tipe F. karena memiliki kandungan kimia yang tinggi akan silika (SiO₂), alumina (Al₂O₃), dan besi (Fe₂O₃). *Fly ash* tipe F ini memiliki sifat reaktif yang sangat baik dan memiliki potensi untuk meningkatkan kekuatan dan ketahanan material konstruksi. Dengan sifat reaktifnya yang baik, *fly ash* tipe F dapat memberikan kontribusi positif dalam meningkatkan performa konstruksi, terutama dalam hal kekuatan struktural dan ketahanan terhadap berbagai kondisi lingkungan yang merusak.

Dalam aplikasinya, penggunaan *fly ash* tipe F dalam campuran konstruksi dapat memberikan efek positif dalam meningkatkan kualitas material. Kemampuannya untuk meningkatkan kekuatan dan ketahanan konstruksi membuatnya menjadi pilihan yang populer dalam industri konstruksi. Selain itu, *fly ash* tipe F juga dapat membantu mengurangi penggunaan bahan baku lain yang lebih mahal, serta memiliki dampak lingkungan yang lebih

rendah karena merupakan produk daur ulang dari pembakaran batu bara. Dengan demikian, *fly ash* tipe F dapat memberikan manfaat yang signifikan dalam pembangunan berkelanjutan dan ramah lingkungan.



Gambar 2.4 Bentuk Partikel *Fly Ash*

2.5 Pengujian Marshall

Pengujian Marshall merupakan salah satu metode yang umum digunakan agar dapat mengevaluasi kualitas dan kekuatan perkerasan jalan dengan menggunakan sampel. Kualitas dan kekuatan dari suatu benda uji dapat ditinjau dari beberapa parameter diantaranya angka ketahanan (*stability*), kelelahan/defomasi (*flow*), volume rongga udara dalam campuran (VIM), volume rongga di antara agregat mineral (VMA), volume rongga yang terisi aspal (VFB), dan rasio stabilitas terhadap flow (MQ). Adapun standar yang digunakan dalam pengujian Marshall adalah ASTM D6926-10 dan SNI 06-2489:1991.